

# **Adaptive Flüssigkristall-Elemente für moderne mikrooptische Systeme**



Vom Fachbereich Physik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades  
eines Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

genehmigte  
**DISSERTATION**

von  
**Dipl.-Phys. Mathias Hain**  
aus Wiesbaden

Referent:	Prof. Dr. T. Tschudi
Korreferent:	Prof. Dr. W. Seelig
Tag der Einreichung:	16. April 2003
Tag der Prüfung:	19. Mai 2003

Darmstadt 2003

D17



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Flüssigkristalle</b>	<b>11</b>
2.1	Einleitung . . . . .	11
2.2	Struktur von Flüssigkristallen . . . . .	11
2.3	Nematische Flüssigkristalle . . . . .	12
2.3.1	Schalten im elektrischen Feld . . . . .	13
2.3.2	Einsatz in Phasenmodulatoren . . . . .	15
2.3.3	Dispersionsrelation . . . . .	16
2.3.4	Phasenhub-Spannungscharakteristik (PSC) . . . . .	18
2.3.5	Schaltzeiten . . . . .	21
2.3.6	Optimieren der Schaltzeiten . . . . .	22
2.4	Ferroelektrische Flüssigkristalle . . . . .	29
2.4.1	Deformed Helical Ferroelectrics (DHF) . . . . .	30
2.4.2	Oberflächenstabilisierte ferroelektrische Flüssigkristalle (SSFLC) . .	35
<b>3</b>	<b>Herstellungstechnologien</b>	<b>37</b>
3.1	Herstellung der Elektrodenstrukturen . . . . .	38
3.1.1	Herstellung der Chrom- und ITO-Substrate . . . . .	39
3.1.2	Strukturierung der Elektroden mittels Laserlithographie . . . . .	40
3.1.3	Beschichtungs- und Entwicklungsprozesse . . . . .	42
3.1.4	Herstellung einlagiger Elektrodenstrukturen mittels Photolithographie	43
3.1.5	Herstellung zweilagiger Elektrodenstrukturen mittels Liftoff-Prozess	43
3.2	Herstellung der Flüssigkristallzellen . . . . .	44
3.2.1	Orientierungsschichten . . . . .	44
3.2.2	Montage und Befüllen der Zellen . . . . .	46
3.2.3	Kontaktierung . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Optisches DVD-Modul mit axialem Doppelfokus</b>	<b>51</b>
4.1	Aufbau eines konventionellen optischen DVD-Abtasters . . . . .	51
4.2	Neuer optischer Abtastkopf mit axialem Doppelfokus . . . . .	53
4.3	Die konvexe Flüssigkristalllinse (CLC-Linse) . . . . .	57
4.3.1	Einleitung . . . . .	57

4.3.2	Aufbau einer CLC-Linse . . . . .	57
4.3.3	Simulationen . . . . .	58
4.3.4	Messungen . . . . .	59
4.4	Die adaptive Flüssigkristalllinse (ADLC-Linse) . . . . .	62
4.4.1	Aufbau . . . . .	62
4.4.2	Elektrodendesign . . . . .	64
4.4.3	Simulationen . . . . .	64
4.4.4	Messungen . . . . .	67
4.5	Vermessen des Gesamtsystems . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Neues optisches Laufwerk für BluRay-Disks</b>	<b>75</b>
5.1	Das BluRay-Laufwerk . . . . .	75
5.2	Simulationen . . . . .	77
5.2.1	Auftreten von sphärischen Aberrationen . . . . .	77
5.2.2	Auftreten von Koma . . . . .	81
5.3	Sphärisches Kompensationselement . . . . .	82
5.3.1	Aufbau . . . . .	83
5.3.2	Elektrodendesign . . . . .	84
5.3.3	Simulationen . . . . .	88
5.3.4	Beugung am Phasenprofil . . . . .	89
5.3.5	Vermessen der Wellenfront . . . . .	90
5.4	Verbesserte CLC-Linse als Kompensationselement . . . . .	90
5.4.1	Optimieren der Transmission . . . . .	92
5.4.2	Optimieren der Schaltzeiten . . . . .	94
5.5	Kompensationselement zur Korrektur von Koma . . . . .	95
5.5.1	Elektrodendesign . . . . .	96
5.5.2	Vermessen der Wellenfront . . . . .	97
5.6	Vermessung der Kompensationselemente in einem Testlaufwerk . . . . .	99
<b>6</b>	<b>Weitere adaptive FK-Elemente</b>	<b>103</b>
6.1	Die verbesserte adaptive Flüssigkristalllinse (EADLC-Linse) . . . . .	103
6.1.1	Elektrodendesign . . . . .	104
6.1.2	Berechnung der Leiterbahnwiderstände . . . . .	105
6.1.3	Simulationen . . . . .	106
6.1.4	Messungen . . . . .	108
6.1.5	Variation der Brennweite . . . . .	111
6.1.6	Interferometrische Vermessung . . . . .	111
6.2	Adaptiver Strahlformer (Gauß → Doughnut) . . . . .	117
6.2.1	Optische Wirbel . . . . .	117
6.2.2	Elektrodendesign . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>

Inhaltsverzeichnis	5
--------------------	---

---

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>126</b>
-----------------------------	------------

<b>Publikationsliste</b>	<b>133</b>
--------------------------	------------

<b>Danksagung</b>	<b>137</b>
-------------------	------------

<b>Lebenslauf</b>	<b>139</b>
-------------------	------------



# 1 Einleitung

Der stetige Trend der Miniaturisierung in den Bereichen der Telekommunikation und der Datenspeicherung (CD/DVD) zwingt zu immer neuen Vorgehensweisen beim optischen Systemdesign. Ein zunehmend an Bedeutung gewinnender Bestandteil kompakter optischer, sog. mikrooptischer Systeme, sind aktive Komponenten, die es ermöglichen, optische Funktionen (z. B. Brennweite, Vergrößerung, Strahlposition) dynamisch einzustellen oder nachregeln zu können.

Neben mechanischen Lösungen, bei denen die Position optischer Komponenten (z. B. Linsen, Prismen, Spiegel) durch Stellglieder (Piezos, kapazitive oder induktive Aktuatoren, etc.) angepasst werden kann, gibt es die Möglichkeit, hierzu Phasenmodulatoren einzusetzen. Durch die mit ihnen erreichbare hohe Integrationsdichte ist die Entwicklung völlig neuartiger, sehr kompakter Optikmodule denkbar, die ohne den Einsatz mechanischer Bauelemente und den damit verbunden Problemen wie Verschleiß- und Erschütterungserscheinungen auskommen. Die Modulation der Wellenfront erlaubt hierbei die Realisierung deutlich komplexerer optischer Funktionen, wie beispielsweise die Korrektur von Aberrationen, die mit herkömmlichen Optiken schwierig bzw. durch den erhöhten Platzbedarf nicht umsetzbar sind.

Modulatoren auf der Basis elektrooptischer Effekte (Kerr-, Pockelseffekt) erlauben schnelle Schaltzeiten im 10-100 ps-Bereich [1] [2], sind jedoch aufgrund ihres geringen Phasenhubs ( $\phi \sim \Delta n \cdot d$ ,  $\Delta n \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ ) sowie der damit verbunden langen Bauformen nicht zum Einsatz in mikrooptischen Systemen geeignet.

Die heute in diesen Systemen eingesetzten Phasenmodulatoren sind in der Regel Arrays von Modulatoren und beruhen entweder auf mikromechanischen Lösungen (MEMS, Micro-Electro-Mechanical-Systems) [3] oder arbeiten auf Basis von Flüssigkristallen [4].

MEMS sind Arrays von einzeln verstellbaren Mikrospiegeln, die ihre vertikale Position und somit die Wellenfront in Reflexion modulieren können [5] [6]. Alternativ dazu gibt es die Möglichkeit, Membranflächen [7] einzusetzen, die an Gitterpunkten deformiert werden. Die Ansteuerung kann hierbei kapazitiv [6], magnetoresistiv [8], thermisch [9] oder auf andere Weise erfolgen. MEMS zeichnen sich durch schnelle Schaltzeiten (ms) und einen hohen Füllfaktor (>90 %) aus. Der Füllfaktor beschreibt das Verhältnis Spiegelfläche zu Gesamtfläche und ist für den Wirkungsgrad des Systems entscheidend. Neben Phasenhüben von mehreren Wellenlängen (Spiegelhub 1-15  $\mu\text{m}$  [6] [10]) sind diese Systeme wellenlängenunabhängig. Nachteile sind das häufig hysteresebehaftete Schaltverhalten, die herstellungsbedingten Höhenunterschiede der Spiegel im Array, Deformationen der Spiegelflächen bei hohen Frequenzen und die zur Zeit noch sehr hohen Stückkosten. Darüber hinaus sind sie nur in Reflexion betreibbar.

Flüssigkristallbasierende Phasenmodulatoren (FK-Modulatoren) können sowohl für den Betrieb in Transmission (wie bei LCD-Displays [11]) wie auch in Reflexion (LCOS - Liquid Crystal on Silicon [12]) hergestellt werden. Die sich noch in Entwicklung befindlichen LCOS-Elemente zeichnen sich wie die MEMS durch einen hohen Füllfaktor und einen damit verbundenen hohen Wirkungsgrad aus. Im Vergleich zu diesen besitzen sie längere Schaltzeiten im Bereich von 5-100 ms, stellen jedoch die kostengünstigere Alternative dar. Transparente FK-Modulatoren sind universell einsetzbar, besitzen jedoch, bedingt durch die in der Fläche liegenden Zuleitungen, einen in der Regel geringeren Füllfaktor (40 %-90 %). Durch Wahl der Zelldicke lassen sich Modulatoren mit großen Phasenhüben ( $\geq 40\lambda$ ) realisieren. Die im Detail steckenden Probleme (Ansteuerung, Schaltzeiten, Qualität der Wellenfront, Beugungs- und Absorptionsverluste, Materialien, Systemdesign, etc.) machen FK-basierende Phasenmodulatoren bisher nur für wissenschaftliche Anwendungen interessant, wie beispielsweise in der Astronomie (Korrektur von Aberrationen [13]) oder zur Pulsformung von Femtosekunden-Lasern [14]. Der Einsatz in Massenprodukten ist aufgrund der bisher ungelösten Probleme (Wellenfrontqualität, Wirkungsgrad, Schaltzeiten, Ansteuerung, Stückkosten) noch nicht gelungen. Genau hier setzt diese Arbeit an. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung von FK-Modulatoren zum Einsatz in mikrooptischen Systemen, insbesondere in DVD-Laufwerken. Wesentliche Kriterien dabei waren die Erzeugung problemangepasster, möglichst aberrationsfreier Wellenfronten sowie die Verbesserung der Zellen bezüglich Schaltzeiten und Transmission. Neben den hohen optischen Anforderungen war es zwingend notwendig, den Aufwand für die elektrische Ansteuerung im Vergleich zu existierenden Phasenmodulatoren deutlich zu reduzieren, um FK-Modulatoren erstmalig in kommerziellen Produkten etablieren zu können.

Das Arbeitsfeld dieser Dissertation ist breit gestreut. Da das Gebiet der adaptiven Optik am Institut im Rahmen dieser Dissertation ins Leben gerufen wurde, mussten zuerst die Grundlagen zur Herstellung und Fertigung solcher Elemente gelegt werden. Um die gesteckten Ziele zu erreichen, wurden Simulationen zu den Laufwerken durchgeführt und darauf basierend Konzepte für die Entwicklung adaptiver FK-Optiken erarbeitet. Die zur Herstellung notwendigen Fertigungstechniken mussten entwickelt, Messaufbauten zur Charakterisierung der Elemente und des Gesamtsystems geschaffen werden. Die gesamte Kette der Entwicklung, der Herstellung, der Vermessung sowie der Grundlagenuntersuchungen an Materialien sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Zur Entwicklung geeigneter FK-Modulatoren ist eine genaue Kenntnis der verwendeten Flüssigkristallmaterialien erforderlich. In Kap. 2 werden die grundlegenden Eigenschaften von Flüssigkristallen besprochen und ihre Verwendbarkeit zur Phasenmodulation aufgezeigt. Zum Bau von adaptiven Optiken wurden sowohl nematische wie auch erstmals ferroelektrische FKe, sog. *Deformed Helical Ferroelectrics (DHF)*, untersucht. Zur Charakterisierung der in der Optik relevanten Parameter wie Dispersion, Doppelbrechung, Phasenhub-Spannungs-Abhängigkeit, Streuung und Polarisationsdrehung wurden mehrere rechnergestützte Aufbauten realisiert, welche in den einzelnen Abschnitten vorgestellt werden.



Kap. 3 beschäftigt sich mit den Herstellungsverfahren von FK-Modulatoren. Durch die Modifikation bereits am Institut vorhandener Technologien (Laserlithographie, Beschichtungsanlagen) und durch Entwicklung neuer Verfahrenstechniken konnten im Laufe dieser Arbeit alle wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung von Phasenmodulatoren etabliert werden: Angefangen beim Beschichten der Trägersubstrate mit Antireflex-, Leit- und Orientierungsschichten über das Schreiben und Kopieren von Elektrodenstrukturen mittels Laser- und Photolithographie bis hin zur Herstellung und Charakterisierung von Prototypen und der Vermessung der Elemente im Gesamtsystem. Die Herstellungsverfahren sind denen von FK-Displays ähnlich, mussten jedoch für den Laborbetrieb abgewandelt sowie zum Teil völlig neu entwickelt werden. Die Beschichtungsprozesse wie das Aufbringen von Orientierungsschichten sowie von Photolack konnten mittels Spincoating, die Beschichtung von Leit- und Antireflexschichten mittels Elektrodenstrahlverdampfen und Sputtern erreicht werden. Für das Befüllen der Zellen unter Vakuum, die Bearbeitung der Orientierungsschichten sowie für die Zellmontage wurden eigens Geräte entwickelt. Ein weiterer Schwerpunkt war die Weiterentwicklung des im Hause eigenen Laserlithographiesystems, das im Laufe der Arbeit auf das Schreiben vektoriell vorliegender Elektrodenstrukturen umgerüstet werden konnte.

Die Entwicklung der ersten adaptiven optischen Elemente (FK-Modulatoren) stand in direktem Zusammenhang mit einem in der Arbeitsgruppe parallel entwickelten neuartigen optischen DVD-Abtastkopf, der in Kap. 4 vorgestellt wird. Das Ziel bestand darin, ein Laufwerk zu realisieren, das neben einem kostengünstigen modularen Aufbau durch den Einsatz diffraktiver optischer Elemente (DOEs) in der Lage sein sollte, beide Ebenen einer Digital Versatile Disk (DVD) auslesen zu können. Hierzu wurde eine Optik benötigt, die polarisationsbedingt zwei Foki erzeugt und je nach angelegter Spannung die Abstände der Foki gegeneinander variiert. Ein solches Konzept war mit herkömmlichen Optikkomponenten in Betracht der Anforderungen eines Laufwerkkopfes (Kompaktheit, Größe, Kosten) nicht umzusetzen. Durch den Einsatz von FK-Linsen, der *Convex Liquid Crystal Lens (CLC)* sowie der *Adaptive Liquid Crystal Lens (ADLC)*, die in den Abschnitten 4.3 und 4.4 vorgestellt werden, konnte dieses Problem gelöst werden.

Durch die Realisierung von FK-Modulatoren, die sich neben einer hohen Effizienz durch eine extrem einfache Ansteuerung auszeichneten, konnten die gewonnenen Erfahrungen auf weitere Problemstellungen bei optischen Laufwerken übertragen werden. Die nächste Generation optischer Laufwerke (BluRay) stellt im Vergleich zu heutigen DVD-Laufwerken höhere Anforderungen an die Optik. Um die neuen Disks (25 GB/Datenschicht) lesen und beschreiben zu können, wird die Systemwellenlänge durch den Einsatz blauer Laserdioden (Nichia) von 650 nm auf 405 nm reduziert und die Numerische Apertur (N.A.) der Objektivlinse von 0.6 auf 0.85 angehoben. Diese Systemanpassung führt aufgrund der gewachsenen Systemsensibilität gegenüber Aberrationen ( $\lambda/N.A.^n$ ) zu zwei kritischen Umständen, die eine aktive Kompensation von Wellenfrontfehlern erfordern und auf die in Kap. 5 eingegangen wird. Durch den Einsatz von FK-Modulatoren, welche sich durch ein an die Anforderungen angepasstes Elektrodendesign auszeichnen, konnte so mit minimalem Ansteueraufwand (3 Elektroden) eine dynamische Korrektur der Wellenfrontfehler (Koma und

sphärische Aberrationen) erfolgen.

Neben den hier vorgestellten Elementen lassen sich FK-Modulatoren für eine Vielzahl von Anwendungen optimieren. So konnten im Laufe der Arbeit weitere Elemente zur dynamischen Strahlformung und Fokussierung entwickelt werden, auf die in Kap. 6 im Detail eingegangen wird.

## 2 Flüssigkristalle

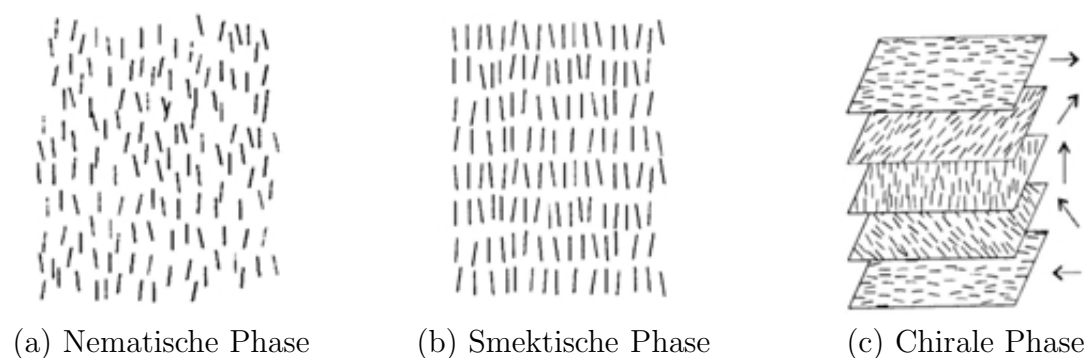
### 2.1 Einleitung

Der in den letzten 10 Jahren stattgefundene Boom der Displaytechnologie hat die Flüssigkristallforschung enorm beflügelt. Mit dem Ziel, immer brillantere und schnellere Displays zu entwickeln, wurde mit hohem Aufwand die Untersuchung an Materialien vorangetrieben. Hierbei standen vor allem Aspekte wie Amplitudenmodulationsfähigkeit, Optimierung des Blickwinkels, Farbtreue, Temperaturbereich, Schaltzeiten sowie optimale Ansteuereigenschaften der Materialien im Vordergrund. Neben der Amplitudenmodulation können FKe auch zur Phasenmodulation eingesetzt werden. FK-Hersteller machen in der Regel nur wenige Angaben zu deren optischen Eigenschaften. Deshalb war es im Laufe der Arbeit notwendig, für die Phasenmodulation relevante optische Eigenschaften (Materialdispersion, Phasenhub vs. Spannung, Streuung, Polarisationserhalt, etc.) selbst zu ermitteln. Der folgende Abschnitt gibt einen Einblick in den Aufbau von FK-Materialien und deren Verwendbarkeit zur Phasenmodulation und stellt Messmethoden zu deren Charakterisierung sowie die gewonnenen Ergebnisse vor. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt bei der Optimierung der gebauten Phasenmodulatoren war die Reduktion der Schaltzeiten. Hierfür wurden verschiedene Schalteffekte und Materialklassen untersucht. Abschn. 2.3.6 zeigt anhand eigener Messungen, wie die Reduktion der Schaltzeit mittels angepasster Ansteuerungsverfahren und durch Verwendung alternativer Materialien (Nematische Zwei-Frequenzmischungen, Ferroelektrische FKe) möglich ist.

### 2.2 Struktur von Flüssigkristallen

Flüssigkristalle (FKe) sind Substanzen, die neben einer festen (kristallinen) und einer flüssigen (isotropen) Phase weitere Phasenzustände, so genannte Mesophasen, ausbilden. Eine solche Substanz wurde erstmals 1888 von dem österreichischen Botaniker Friedrich Reinitzer beim Schmelzen von Benzoessäurecholesterylester entdeckt und von O. Lehmann zwei Jahre später physikalisch erklärt. Flüssigkristalle werden in zwei Klassen unterteilt. Es gibt *lyotrope* Flüssigkristalle, die durch Zusatz von Lösungsmitteln Mesophasen ausbilden, und *thermotrope* Flüssigkristalle, bei denen Mesophasen in Abhängigkeit von der Temperatur entstehen. Eine Voraussetzung für thermotrope FKe ist eine anisotrope Molekülstruktur. Diese kann sowohl durch einen stäbchenförmigen (*calamitischen*) als auch durch einen scheibenförmigen (*diskotischen*) Molekülaufbau realisiert werden. Die im Rah-

men der Dissertation verwendeten Materialien gehören alle zur Klasse der thermotropen Calamiten. Diese können je nach Ordnungszustand noch einmal unterteilt werden. Die Phase mit der einfachsten Ordnung ist die nematische Phase. Diese zeichnet sich durch eine bevorzugte Parallelorientierung der Moleküllängsachsen, jedoch ohne räumliche Positionsordnung der Einzelmoleküle aus (Abb. 2.1 a).



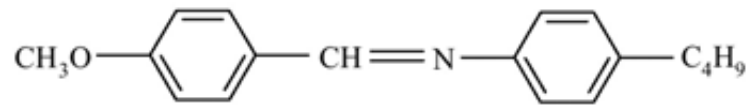
**Abb. 2.1:** Grundphasen

Flüssigkristalle mit einer ausgeprägten nematischen Mesophase werden häufig auch als Nematzen bezeichnet. Zur Beschreibung der Hauptachsen eines FK-Systems sei im Folgenden ein Direktor  $\vec{n}$  definiert, welcher die gemittelte Ausrichtung der Moleküle beschreibt. Den nächst höheren Ordnungszustand stellt die smektische Phase dar. Hierbei tritt zusätzlich zur bevorzugten Richtungsorientierung eine Positionsordnung der Moleküle ein, die sich in Schichtstrukturen anordnen (Abb. 2.1 b). Je nach Art der Molekülanordnung können diese in weitere Unterphasen (Smektisch A - Smektisch K) unterteilt werden. Tritt zwischen den Schichten eine Drehung der Direktorachse auf, so spricht man von chiralen Phasen (Abb. 2.1 c).

## 2.3 Nematische Flüssigkristalle

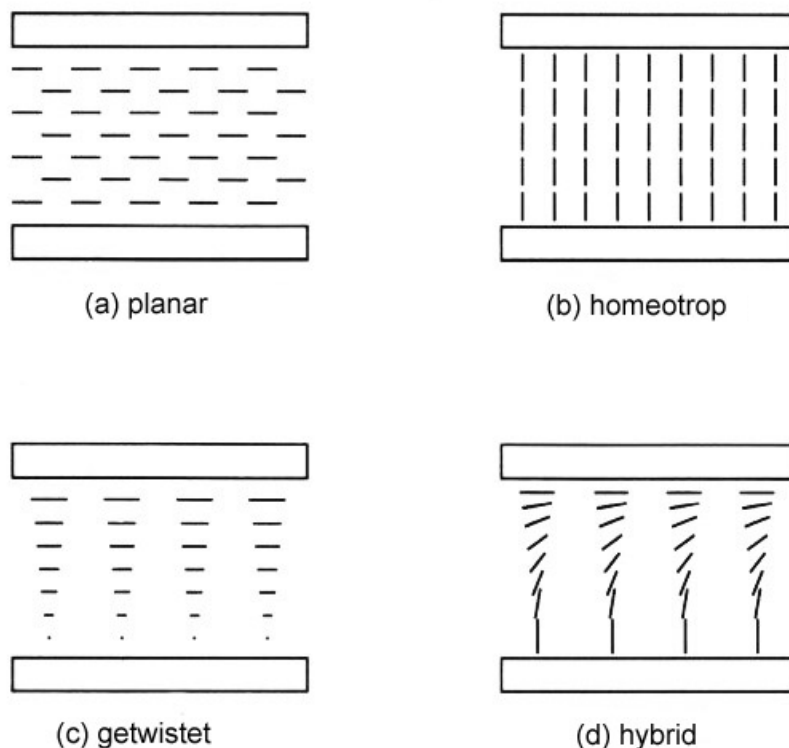
Zur Entwicklung von Phasenmodulatoren werden in den meisten Fällen nematische FKe eingesetzt. Ihr großer Erfolg stützt sich auf die einfache Handhabung und ihre hervorragenden optischen und elektrooptischen Eigenschaften. Ein typischer Vertreter nematischer FKe stellt der FK MBBA (4-MethoxyBenzyliden-4'-ButylAnilin) dar. Seine Struktur ist in Abb. 2.2 abgebildet. Durch geeignete Modifikation einzelner polarer Gruppen können gezielt optische Eigenschaften verändert werden. Eine ausführliche Übersicht zur Synthese und Optimierung von FKs sowie deren Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen ist in [15] und [16] gegeben.

FK-Moleküle an Begrenzungsflächen erfahren hohe Bindungskräfte (Anchoring forces) und erzeugen über molekulare Wechselwirkung eine Vorzugsrichtung in der Zelle. Durch die Verwendung geeigneter Orientierungsschichten (Polyimide, Lecithin, Polymere, etc.) kann



**Abb. 2.2:** Strukturformel von MBBA (Methoxybenzilidene Butylaniline), eines verbreiteten nematischen FK's

eine planare (Abb. 2.3 a), homeotrope (Abb. 2.3 b), getwistete (Abb. 2.3 c) bzw. hybride (Abb. 2.3 d) Molekülanordnung realisiert werden.

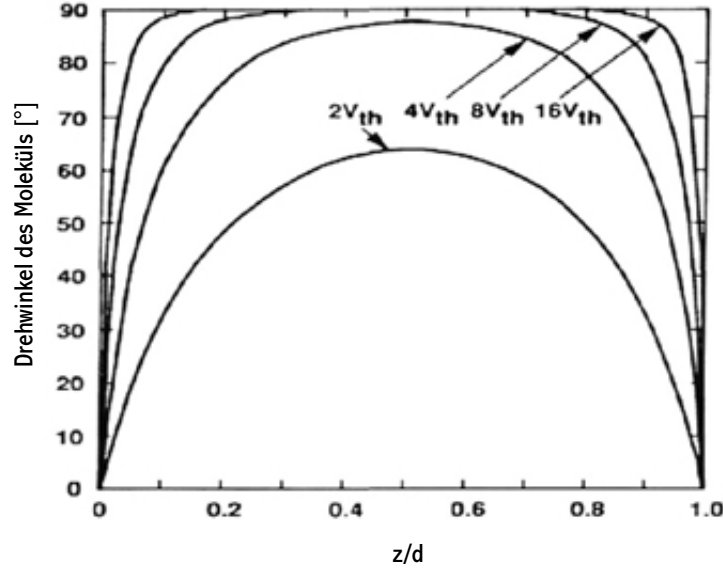


**Abb. 2.3:** Orientierungsmöglichkeiten von Nematiken

### 2.3.1 Schalten im elektrischen Feld

Nematiken besitzen keine makroskopische Polarisierung. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes findet eine Ladungsverschiebung in den Molekülen statt. Der Flüssigkristall wird zum Dipol und richtet sich aufgrund der wirkenden Feldkräfte entlang der Feldlinien aus. Die elektrische Feldkraft steht molekularen Orientierungskräften gegenüber. Durch die starke Anbindung der Randmoleküle entsteht eine von der Feldstärke und dem Abstand zur

Begrenzungsfläche abhängige Molekülauslenkung. Abb. 2.4 zeigt die entstehende örtliche Molekülauslenkung beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes.



**Abb. 2.4:** FK-Auslenkwinkel bei verschiedenen Spannungen.  $d$  stellt hierbei die Zelldicke,  $z/d$  die normierte Position in der Zelle dar. Die Graphen sind für verschiedene Vielfache der Schwellspannung  $V_{th}$  dargestellt.

Die Ein- und Auszeiten bei Nematen sind wegen der wirkenden Auslenkkräfte unterschiedlich. Beim Einschalten des elektrischen Feldes wirken starke Feldkräfte und erlauben eine schnelle Auslenkung der Moleküle. Werden die Feldkräfte reduziert, fallen die FK-Moleküle, getrieben durch schwächere molekulare Rückstellkräfte, zurück und benötigen entsprechend mehr Zeit. Zur Ansteuerung von Nematen werden in der Regel elektrische Wechselfelder verwendet. Diese verhindern durch das schnell wechselnde Dipolmoment eine Lageänderung der Moleküle und unterbinden dadurch Fluss, Oberflächenladungen sowie den damit verbundenen Aufbau eines Gegenfeldes.

Das örtliche wie zeitliche Verhalten des FK-Direktors im elektrischen Feld kann mit Hilfe der Erickson-Leslie-Gleichungen (Gl. 2.1) beschrieben werden.

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta z} [(K_{11} \cos^2 \phi + K_{33} \sin^2 \phi) \frac{\delta}{\delta z}] + (K_{33} - K_{11}) \sin \phi \cos \phi \left( \frac{\delta \phi}{\delta z} \right)^2 \\ + (\alpha_2 \sin^2 \phi - \alpha_3 \cos^2 \phi) \frac{\delta \nu}{\delta z} + \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin \phi \cos \phi = \gamma_1 \frac{\delta \phi}{\delta t} + I \frac{\delta \phi^2}{\delta t^2} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Die elastischen Konstanten  $K_{11}$ ,  $K_{22}$  sowie  $K_{33}$  sind hierbei mit dem Deformationswinkel

$\alpha$ , der Fließ- und Rotationsviskosität  $\nu$ ,  $\gamma_1$  des FKs, dem elektrischen Feld  $E$ , den Leslie-Koeffizienten  $\alpha_{2,3}$  sowie dem Trägheitsmoment  $I$  des FK-Direktors verbunden.

Für homeotrope, planare und getwistete FK-Orientierungen lässt sich die Differenzialgleichung analytisch lösen. Neben der zeitlichen und örtlichen Direktorverteilung erhält man Aussagen über die zu erwartenden Schaltzeiten. Die aus den Erickson-Leslie-Gleichungen hergeleiteten Schaltzeiten für verschiedene Zellkonfigurationen werden in den jeweiligen Kapiteln erläutert. Eine detaillierte Herleitung wird in [15] gegeben.

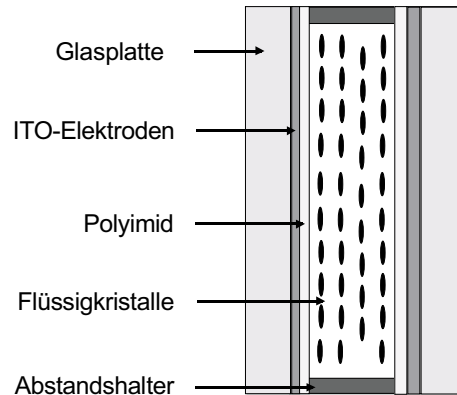
### 2.3.2 Einsatz in Phasenmodulatoren

Phasenmodulatoren sind optische Elemente, die die Wellenfront des einfallenden Lichts lokal verzögern. Für elektrisch schaltbare Phasenmodulatoren wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurden, waren daher Materialien notwendig, die ihren Brechungsindex in Abhängigkeit der angelegten Spannung ändern. Nematische Flüssigkristalle eigneten sich aufgrund der hohen Brechungsindexänderung bei moderaten Spannungen hervorragend für diese Aufgabe. Bei den entwickelten Phasenmodulatoren wurden die Nematiten zwischen zwei parallelen Glasplatten eingelagert. Strukturierte Elektroden auf den Glasplatten leisteten die Ansteuerung der dünnen (5-50 Mikrometer) phasenmodulierenden Schicht und erzeugten damit die gewünschten Phasenprofile. Das von der FK-Zelle erzeugte Phasenprofil  $\phi(x, y)$  wird unter Verwendung der skalaren Beugungstheorie mit der komplexen Phasenfunktion  $t(x, y) = e^{i\phi(x, y)}$  beschrieben. Die Ausbreitung der Wellenfront hinter dem Flüssigkristallelement kann in der jeweils geeignetsten Form, z.B. mit ASM (Angular Spectrum Method), Fresnel- oder Fraunhofer-Beugung, berechnet werden (siehe Abschn. 4.4.3). Ist die einfallende ( $\phi_{\text{ein}}(x, y)$ ) und die zu erzielende ( $\phi_{\text{aus}}(x, y)$ ) Phasenfunktion bekannt, so lässt sich die Phasenfunktion des FK-Elementes bestimmen zu

$$\phi(x, y) = \phi_{\text{aus}}(x, y) - \phi_{\text{ein}}(x, y). \quad (2.2)$$

Die Phasenfunktion sowie das Schaltverhalten eines Phasenmodulators wird durch die Wahl des Flüssigkristallmaterials, durch die Zellgeometrie sowie durch die verwendete Elektrodenstruktur bestimmt. Durch die Anwendung verschiedener Techniken bei der Ansteuerung und der Entwicklung des Elektrodenlayouts wurde es im Laufe der Arbeit möglich, schnelle, effiziente und einfach anzusteuern Phasenmodulatoren zu realisieren. Neben Phasenmodulatoren, bei denen die Form des Phasenprofils durch die Zellgeometrie bestimmt wird (z.B. CLC-Linse, Abschn. 4.3), kommen in vielen Fällen planparallele FK-Zellen zum Einsatz, in denen das Phasenprofil durch Variation der lokalen Feldstärke erreicht wird. Das Know-How dieser Modulatoren liegt im Elektroden-Design, auf das in den einzelnen Kapiteln im Detail eingegangen wird. Phasenmodulatoren arbeiten in der Regel mit nematischen FKs, die in einer planaren, in seltenen Fällen homeotropen Orientierung zwischen zwei Glasplatten eingebettet werden. Eine auf den Innenseiten der Glassplatten aufgebrachte Orientierungsschicht dient hierbei der einheitlichen Molekülausrichtung, vorhandene Elektrodenflächen ermöglichen die Ansteuerung. Abb. 2.5 zeigt eine solche Zelle mit planarer

FK-Orientierung, welche als Frederickszelle bezeichnet wird.



**Abb. 2.5:** FKe in einer Frederickszelle

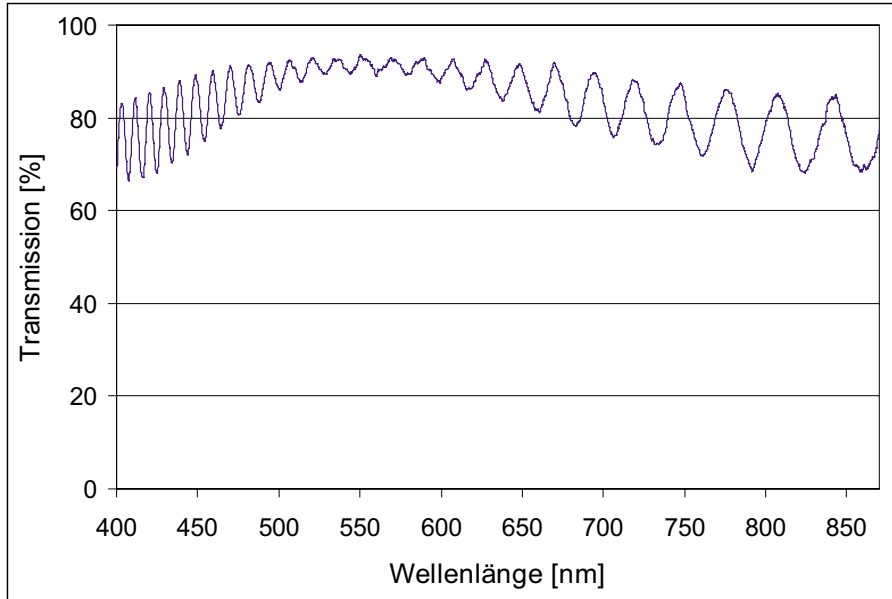
Für die Herstellung von Phasenmodulatoren ist eine genaue Kenntnis des FK-Materials erforderlich. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Messaufbauten realisiert, um FK-Materialien bezüglich ihrer phasenmodulierenden Eigenschaften zu vermessen. Wie in Abb. 2.4 gezeigt, entsteht durch Anlegen eines Feldes eine vom Ort in der Zelle abhängige Molekülauslenkung. Da FKe doppelbrechend sind, erfährt ein parallel zur Direktorachse polarisierter Lichtstrahl einen über die Auslenkung der Moleküle definierten, gemittelten Brechungsindex. Die Abhängigkeit des gemittelten Brechungsindex über die angelegte Spannung ist für die Entwicklung von Phasenmodulatoren von entscheidender Bedeutung und kann mit Hilfe einer Phasenhub Messung (siehe Abschn. 2.3.4) bestimmt werden. Der Phasenhub einer FK-Zelle ist ebenfalls ( $\phi = \frac{2\pi \cdot d \cdot n}{\lambda}$ ) von der Wellenlänge abhängig und mit dieser über die Dispersionsrelation  $\delta n / \delta \lambda$  des FK-Materials verknüpft. Das Messen dieser wichtigen Abhängigkeiten, die Dispersion des Materials sowie die Phasenhub-Spannungscharakteristik (PSC) des Phasenmodulators sind Gegenstand der folgenden Abschnitte.

### 2.3.3 Dispersionsrelation

Zur Messung der Wellenlängenabhängigkeit der Brechungsindizes des Flüssigkristalls  $n_e(\lambda)$  und  $n_o(\lambda)$  sowie der Doppelbrechung  $\Delta n(\lambda) = n_e(\lambda) - n_o(\lambda)$  wurden verschiedene Testzellen gebaut und unter Verwendung eines Spektrometers AVS-USB2000 der Fa. Avantes vermessen. Durch die hochbrechenden und somit reflektiven ITO-Schichten auf den Glasinnenflächen kommt es beim Durchleuchten der FK-Zelle (Resonator) mittels Weißlicht zu Interferenzeffekten (Farby-Perot-Interferometer) und somit zu einer Intensitätsmodulation über der Wellenlänge. Abb. 2.6 zeigt das auf diese Weise gemessene Spektrum einer 12  $\mu\text{m}$  dicken FK-Zelle.

Aus dem Abstand zweier benachbarter Intensitätsmaxima  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  lässt sich der Bre-





**Abb. 2.6:** Spektrum einer FK-Zelle in einem Transmissionsspektrometer

chungsindex nach Farby-Perot bestimmen zu

$$n = \frac{1}{2d} \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.3)$$

wobei  $n$  der Brechungsindex der Zwischenschicht bei einer gemittelten Wellenlänge  $\frac{(\lambda_2 + \lambda_1)}{2}$  und  $d$  die Dicke der Zwischenschicht darstellt.

Zur Bestimmung der Schichtdicke  $d$  wurde jede Zelle zunächst ohne FK vermessen. Die Dicke der Zelle ergibt sich durch Umformen der Gleichung 2.3 unter Verwendung von  $n = n_{Luft} \approx 1$  zu

$$d = \frac{1}{2} \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (2.4)$$

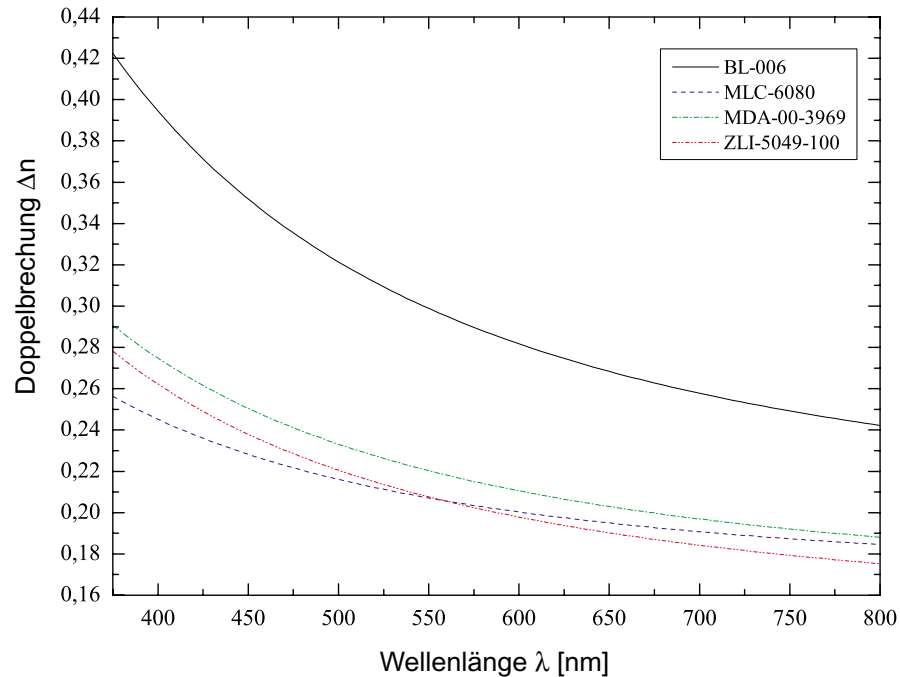
Legt man die Polarisationsachse des Lichtfeldes parallel zum FK-Direktor, so misst man den außerordentlichen  $n = n_e$ , für senkrechte Polarisation den ordentlichen Brechungsindex  $n = n_o$  des Materials.

Nach Berechnung einiger Stützstellen kann die Dispersionsrelation durch einen Fit mittels der Cauchy-Formel

$$\Delta n = a + \frac{b}{\lambda^2} \quad (2.5)$$

approximiert werden, wobei  $a$  und  $b$  die Fitparameter,  $\lambda$  die gesuchte Wellenlänge beschreibt.

Die so ermittelten Dispersionskurven der verwendeten FK-Materialien sind in Abb. 2.7 dargestellt.



**Abb. 2.7:** Dispersionsrelationen von verwendeten nematischen FKEn

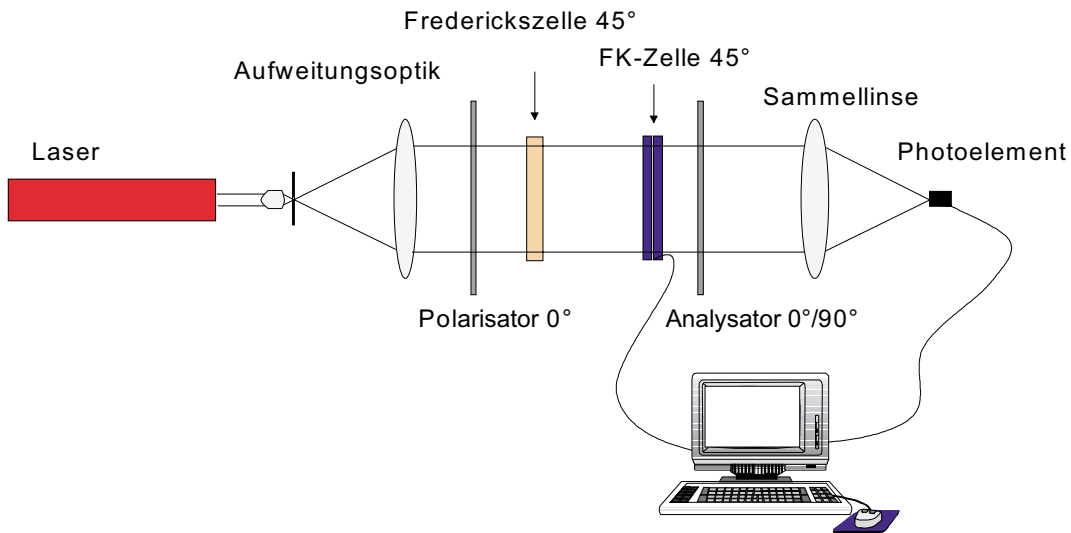
Besonders beeindruckend ist die Dispersionskurve des Materials BL-006 der Fa. Merck. Dieses weist im Vergleich zu anderen getesteten Materialien eine sehr hohe Doppelbrechung ( $\Delta n \approx 0.4$  bei  $\lambda = 400\text{nm}$ ) auf und ermöglicht damit eine große Phasenmodulation bereits bei geringen Zelldicken. Durch dessen Einsatz konnte eine deutliche Verbesserung der Schaltzeiten der in Abschn. 4.3 vorgestellten CLC-Linse erreicht werden.

### 2.3.4 Phasenhub-Spannungscharakteristik (PSC)

Zur korrekten Ansteuerung eines Phasenmodulators ist die Kenntnis des erzeugten Phasenhubs über der angelegten Ansteuerspannung notwendig. Zu dessen Messung wurden zwei unterschiedliche Messmethoden eingesetzt. Zum Messen von FK-Zellen mit beliebiger Zellorientierung kam ein Interferometeraufbau (Mach-Zehnder-Konfiguration) zum Einsatz. Durch Messung der Intensitätsmodulation beim Durchfahren der Ansteuerspannungen wurde der spannungsabhängige Phasenhub ermittelt. Für FK-Zellen mit planarer Orientierung kam ein Polarisations-Verfahren zum Einsatz. Aufgrund des einfachen und

wenig störanfälligen Messaufbaus wurde dieser häufig angewendet und konnte durch Modifikation (siehe Abschn. 2.4.1) auch zum Messen ferroelektrischer FK-Zellen, welche mit dieser Messmethode normalerweise nicht zu vermessen sind, eingesetzt werden. Es wurden im Rahmen von begleitenden Diplomarbeiten mehrere rechnergesteuerte Messaufbauten zur Erfassung der Phasenhub-Spannungs-Charakteristik realisiert [17] [18]. Die Ansteuer- und Analysesoftware wurde in C++ und Labview umgesetzt.

Zur Ermittlung der Phasenhub-Spannungscharakteristik wird die FK-Zelle zwischen zwei Polarisatoren platziert und mittels eines Lasers durchleuchtet. Das transmittierte Licht wird auf einen Detektor fokussiert und dessen Intensität in Abhängigkeit von der Ansteuererspannung aufgezeichnet (siehe Abb. 2.8). Die Hauptachse der FK-Zelle (ist gleich der Reiberichtung des Polyimidfilms und somit der FK-Direktorachse  $\vec{n}$ ) wird hierbei um einen Winkel  $\alpha=45^\circ$  zur Polarisatorachse verdreht. Eine weitere FK-Zelle (Frederickszelle) wird zur späteren Intensitätsangleichung hinter der FK-Zelle ebenfalls um  $45^\circ$  zum Analysator platziert.



**Abb. 2.8:** Messaufbau zur Phasenhubmessung

Die FK-Zelle verhält sich beim Durchlaufen der Ansteuerspannung wie eine dynamische Phasenverzögerungsplatte. Für die gemessene und anschließend normalisierte Intensitätsmodulation bei gekreuzter  $I_\perp$  sowie paralleler Polarisator- / Analysator-Konfiguration  $I_\parallel$  gilt

$$I_\perp(U, \lambda) = \sin^2\left(\frac{\phi(U, \lambda)}{2}\right) * \sin^2(2 * \alpha) \quad (2.6)$$

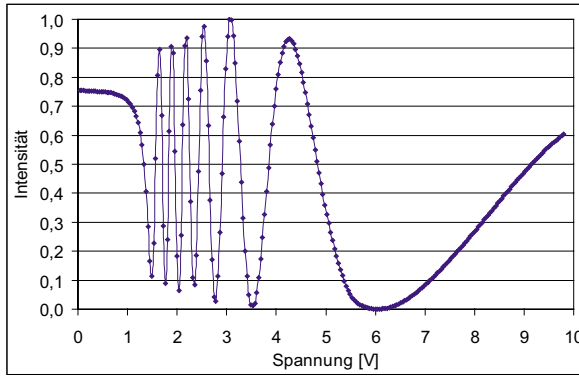
$$I_\parallel(U, \lambda) = 1 - \sin^2\left(\frac{\phi(U, \lambda)}{2}\right) * \sin^2(2 * \alpha) \quad (2.7)$$

wobei  $\phi$  den erzeugten Phasenhub der Zelle darstellt. Wie aus Gleichung 2.6 zu erkennen ist, wird ein maximaler Kontrast bei einem Winkel von  $\alpha=45^\circ$  erreicht. Für diesen Fall vereinfachen sich die Gleichungen zu

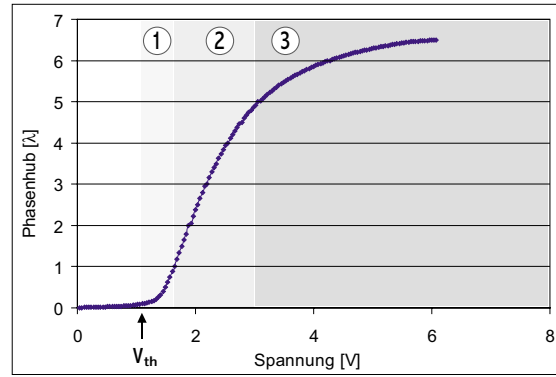
$$I_{\perp}(U, \lambda) = \sin^2\left(\frac{\phi(U, \lambda)}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$I_{\parallel}(U, \lambda) = \cos^2\left(\frac{\phi(U, \lambda)}{2}\right) \quad (2.9)$$

Der gemessene Intensitätsverlauf einer 24  $\mu\text{m}$  dicken FK-Zelle (FK: ZLI-5049-000 Merck) für einen Winkel  $\alpha=45^\circ$  bei einer Messwellenlänge  $\lambda=633 \text{ nm}$  ist in Abb. 2.9 dargestellt.



**Abb. 2.9:** Intensität am Photoelement



**Abb. 2.10:**  
Phasenhub-Spannungscharakteristik

Nach [19] kann mittels  $I_{\perp}$  und  $I_{\parallel}$  der erzeugte Phasenhub  $\phi(U, \lambda)$  bestimmt werden zu

$$\begin{aligned} \phi(U, \lambda) &= m\pi + 2\tan^{-1}1\sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}} \quad m = 0, 2, 4, \dots \\ \phi(U, \lambda) &= (m+1)\pi - 2\tan^{-1}1\sqrt{\frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}} \quad m = 1, 3, 5, \dots \end{aligned} \quad (2.10)$$

Hierbei stellt  $m$  einen Zähler zur Unterscheidung des Eindeutigkeitsbereichs zwischen dem  $m$ ten und  $(m+1)$ ten Intensitätsmaximum dar. Abb. 2.10 zeigt die aus den Messdaten von Abb. 2.9 errechnete PSC. Hier gibt es drei wesentliche Spannungsbereiche. Beginnend an einer Schwellenspannung  $V_{th} \approx 1.4 \text{ V}$  fangen die FK-Molkeüle an, sich verstärkt ins elektrische Feld zu drehen. Der sich anschließende niedrige Spannungsbereich (1) wird in der Regel wegen auftretender Fluktuationen an der Schwelle sowie der langsamen Schaltzeiten

nicht zur Phasenmodulation eingesetzt. Zwischen hier 1.8 V bis ca. 3 V liegt der lineare Spannungsbereich (2). In diesem arbeiten die meisten kommerziellen FK-Modulatoren sowie der während dieser Arbeit entwickelte Strahlumordner (Abschn. 6.2). Für schnelle FK-Modulatoren ist vor allem der obere Spannungsbereich (3) von Interesse. Optische Schalter, schnelle Displays und auch die später vorgestellte ADLC- und EADLC-Linse (siehe Abschnitte 4.4 und 6.1) nutzen diesen Bereich.

Für viele Anwendungen, wie zum Beispiel in der Wellenleiteroptik oder bei schaltbaren Strahlteilern, ist weniger der gewonnene Phasenhub als vielmehr der effektive Brechungsindex  $n_{eff}(U)$  von Interesse. Dieser ergibt sich unter Verwendung der zuvor gemessenen PSC  $\phi(U)$  zu

$$n_{eff}(U) = \phi(U) * \frac{\lambda}{2\pi d} + n_o \quad (2.11)$$

wobei  $d$  der Zelldicke und  $n_o$  dem ordentlichen Brechungsindex bei der Messwellenlänge  $\lambda$  entspricht.

### 2.3.5 Schaltzeiten

Eine wesentlichen Kriterium bei der Entwicklung von FK-Modulatoren ist die Schaltzeit. Diese hängt im wesentlichen vom verwendeten FK-Material, insbesondere von seiner Fließ- und Rotationsviskosität, von seiner Polarisierbarkeit und vom Phasen- und Orientierungszustand des Materials in der Zelle ab. Die Ein- und Ausschaltzeiten einer nematischen FK-Zelle sind wegen der verschiedenen auf die FKe wirkenden Kräfte unterschiedlich. Zum Verständnis der Schaltvorgänge gehen wir von einer planar orientierten Frederickszelle aus und betrachten die FKe in einem Federmodell, wobei jedes Molekül in jeder Raumrichtung mit seinen Nachbarmolekülen verbunden ist. Durch Anlegen einer Spannung findet eine Polarisierung der FK-Moleküle statt und lenkt sie gegen zwischenmolekulare Wechselwirkungskräfte aus. Wird die Haltespannung entfernt, so fallen die Moleküle, getrieben durch die molekularen Rückstellkräfte, zurück. Die Einschaltzeit  $T_{rise}$  (2.12) lässt sich durch höhere Ansteuerspannungen verkürzen, die Ausschaltzeit  $T_{decay}$  (2.13) hingegen nur durch Reduktion der Rotationsviskosität verbessern (Ausnahme Zwei-Frequenzmischungen, siehe Abschn. 2.3.6). Die Schaltzeiten einer Frederickszelle lassen sich durch Lösen der Erickson-Leslie-Gleichungen herleiten und können für eine gegebene Einschaltspannung  $V$  in erster Näherung angegeben werden zu

$$T_{rise} = \frac{\frac{\gamma_1 d^2}{K_{11} \pi^2}}{[(\frac{V}{V_{th}})^2 - 1]} \quad (2.12)$$

$$T_{decay} = \frac{\gamma_1 d^2}{K_{11} \pi^2} \quad (2.13)$$

$K_{11}$  stellt hierbei die elastische Konstante für Splay (dt.: Spreizung),  $\gamma_1$  die Rotationsviskosität,  $V_{th}$  die Schwellspannung und  $d$  die Dicke der Zelle dar.

Die Schaltzeit ist aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Rotationsviskosität von der Temperatur und aufgrund der Dispersion des FK-Materials auch von der Wellenlänge abhängig, da sich die Moleküle zum Erzeugen des gleichen Phasenhubs unterschiedlich weit reorientieren müssen. Die Schaltzeit ist in der Regel unabhängig vom Elektrodenlayout. Die Zeit zum Erreichen einer bestimmten Funktion (z.B. Fokusverschiebung bei der ADLC-Linse) kann sich jedoch von der des FKs unterscheiden. Wo dies der Fall ist, wird darauf gesondert eingegangen.

Zum Messen des Schaltverhaltens und der Schaltzeit wurden die zu vermessenden FK-Elemente wie bei der PSC-Messung zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren unter  $45^\circ$  angeordnet und die auftretende Intensitätsmodulation am Photoelement beim Schalten der Zelle gemessen. Die Ansteuerung der Elektroden und das Auslesen des Photodetektors geschah hierbei computergesteuert. Mit Hilfe einer vor der zu messenden Zelle angebrachten und um  $45^\circ$  orientierten Frederickszelle konnte der Polarisationszustand und somit die Startintensität am Photodetektor geregelt werden. Regelt man die Startintensität auf 0 bzw. Maximum, so ergibt sich die Schaltzeit aus der Dauer, gemessen vom Beginn der Intensitätsmodulation bis zum Erreichen von 90% des neuen Intensitätsplateaus. Die zur Messung verwendete Wellenlänge muss der Anwendung angepasst sein, da sich sowohl die PSC als auch die Schaltzeiten mit der Wellenlänge ändern. Für die meisten Anwendungen wurde ein HeNe-Laser mit 633 nm, für die Kompensationselemente des BluRay-Laufwerks eine Nichia-Laserdiode mit 405 nm verwendet.

Abb. 2.11 zeigt die entstehende Intensitätsmodulation einer  $12\text{ }\mu\text{m}$  dicken Zelle während des Ausschaltvorgangs. Die zuvor angelegte Haltespannung von  $U_{PP}=10\text{ V}$  wurde hierbei abgeschaltet.

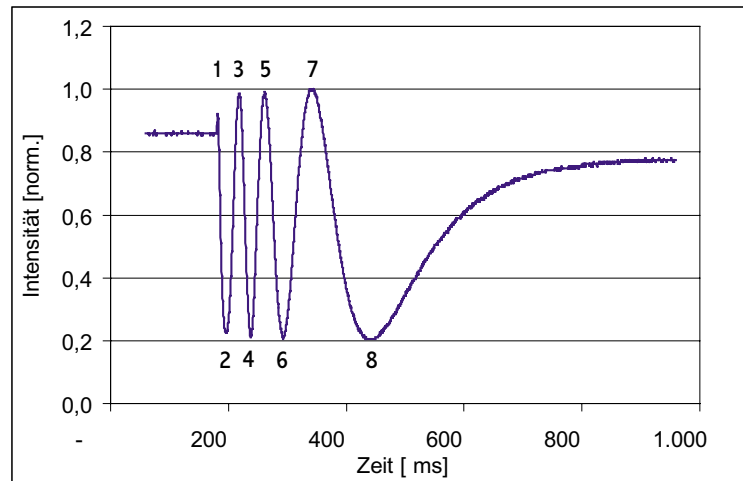
Die aufsteigende Nummerierung stellt jeweils einen Phasensprung von  $\lambda/2$  dar. Man erkennt deutlich den schnellen Relaxationsprozess der FKe zu Beginn der Charakteristik.

Die in Abb. 2.12 gezeigte Kurve stellt eine repräsentative Einzelmessung zur Bestimmung der Schaltzeit für einen Phasenhub von  $2\lambda$  im oberen Spannungsbereich (7.3 V-2.45 V) dar.

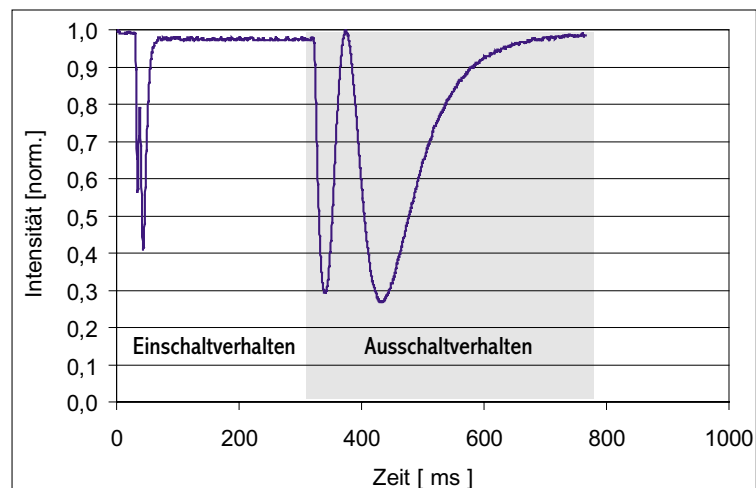
Im vorderen Teil ist das Einschaltverhalten, im hinteren Teil das Ausschaltverhalten zu sehen. Die gemessene Einschaltzeit beläuft sich auf  $t_{ein}=61\text{ ms}$ , die Ausschaltzeit auf  $t_{aus}=654\text{ ms}$ .

### 2.3.6 Optimieren der Schaltzeiten

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war die Realisierung schnell schaltender FK-Modulatoren. Das folgende Kapitel stellt Techniken und Materialien vor, um die Schaltzeiten bei Nematzen zu reduzieren. Im ersten Abschnitt werden Techniken behandelt, die das Schaltverhalten von Nematzen positiv beeinflussen. Der zweite Abschnitt betrachtet die Gruppe



**Abb. 2.11:** Intensitätsmodulation einer FK-Zelle zwischen gekreuzten Polarisatoren beim Abschalten der Versorgungsspannung von  $U_{PP}=10$  V (1 kHz)



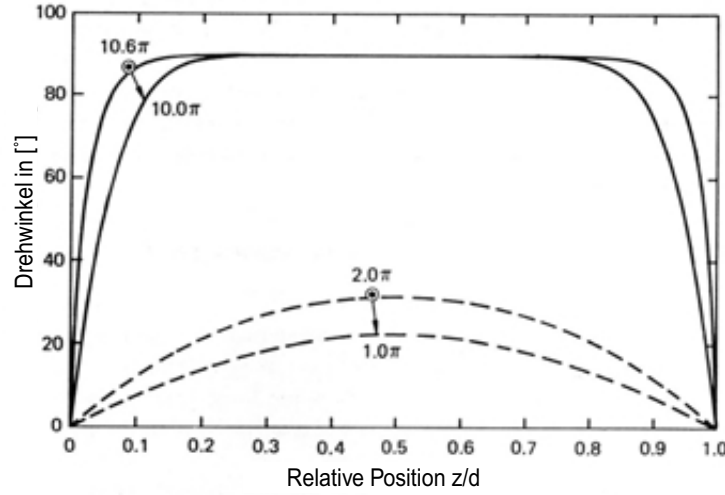
**Abb. 2.12:** Intensitätsmodulation beim Schalten eines Phasenhubs von  $2\lambda$  ( $7.3$  V  $\longleftrightarrow$  2.45 V).

der nematischen Zwei-Frequenz-Mischungen, die es erlauben, die Ausschaltzeit aktiv zu beeinflussen.

### Der Transient-Nematic Effekt

Der Transient-Nematic Effekt beruht auf dem Schalten der Zelle im hohen Spannungsbereich [20] [21]. In diesem Zustand sind fast alle Moleküle ausgelenkt und nur noch

wandnahe Moleküle tragen zur Phasenmodulation bei (siehe Abb. 2.13).



**Abb. 2.13:** Molekülauslenkung entlang der normalisierten Zellposition beim Schalten im unteren und oberen Spannungsbereich. Angaben des Phasenhubs in Vielfachem von  $\pi = \lambda/2$ .

Das dynamische Verhalten der FKe beim Transient-Nematic Effekt kann ebenfalls durch die Erickson-Leslie Gleichungen (Formel 2.1) unter der Annahme  $V \gg V_{th}$  beschrieben werden. Wegen der Komplexität der Gleichungen lassen sie sich nur noch numerisch lösen. Die Ausschaltzeit für einen Phasenhub  $\phi \leq \lambda/2$  ergeben sich hierbei nach [22] zu

$$t_{decay} \approx \left( \frac{\phi/\pi}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{(1 - \xi V_{th}/V_i)^2} \frac{\gamma_1 \lambda^2}{K_{11} \Delta n^2} \quad (2.14)$$

wobei  $\phi$  der Phasenhub zwischen den Ansteuerspannungen  $V_\pi$  und  $V_i$ ,  $\xi$  eine Materialkonstante (Krümmung des spannungsabhängigen Phasenhubs im hohen Spannungsbereich,  $\xi \sim 0.6$  für E-7 bei Raumtemperatur),  $\gamma_1$  die Rotationsviskosität,  $K_{11}$  die elastische Konstante für Spreizung und  $\Delta n$  die optische Anisotropie des FKs bei der Wellenlänge  $\lambda$  beschreibt.

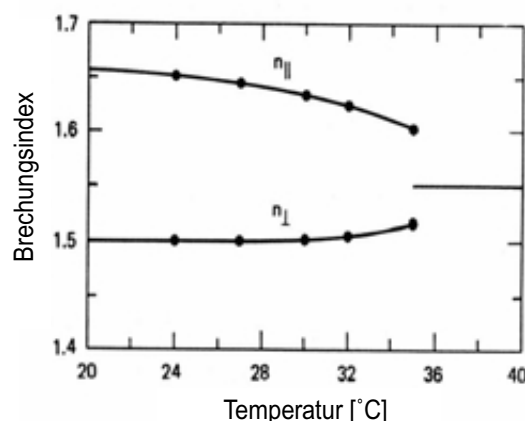
Für eine kurze Ausschaltzeit wird während des Relaxationsvorgangs die Haltespannung vollständig entfernt, wodurch der FK-Direktor keine direkt abbremsende Kraft bezüglich der neuen Ruhelage wahrnimmt. Der lange Relaxationsschwanz, der sonst durch die Haltespannung hervorgerufen wird, kann so entfernt werden. Dieser Schaltmodus ist zum Schalten von Phasenhüben  $\leq \lambda/2$  interessant und konnte vor allem bei der binären adaptiven FK-Linse (siehe Abschn. 4.4) eingesetzt werden.

### Erhöhung der Schaltzeiten durch Temperatur

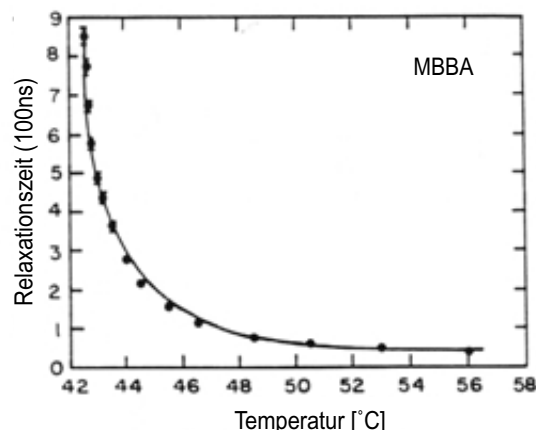
Ein alternativer Weg, die Schaltzeiten bei Nematen zu verkürzen, ist die Verringerung der Rotationsviskosität durch Erhöhung der Zelltemperatur. Hierbei ist darauf zu achten, dass



die Rotationsviskosität  $\gamma$ , welche proportional zur Ausschaltzeit ist, und die Doppelbrechung, die proportional zum erzeugten Phasenhub ist, gegeneinander arbeiten (Abb. 2.14 und 2.15).



**Abb. 2.14:** Abhängigkeit des Brechungsindex von der Temperatur.



**Abb. 2.15:** Abhängigkeit der Relaxationszeit von der Temperatur.

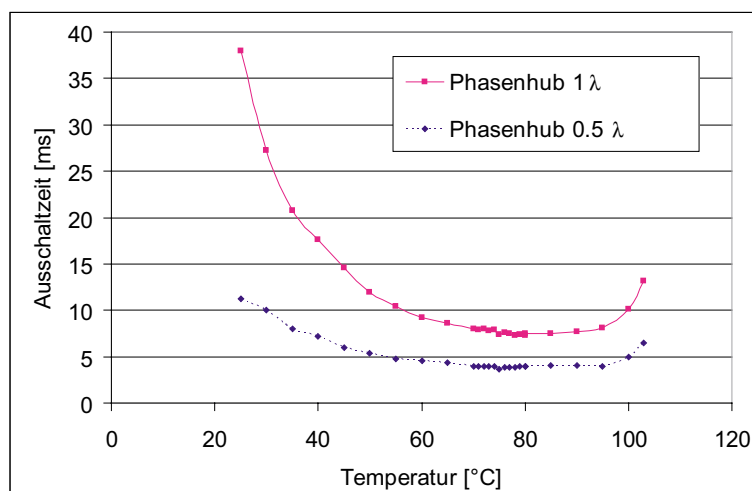
Wu et al. [23] haben gezeigt, dass sich dieser Effekt ebenfalls theoretisch modellieren lässt. Hierbei kann man mit Hilfe eines Ordnungsparameters  $S$ , der die mittlere Ausrichtung der FK-Moleküle beschreibt, eine Optimierungsfunktion (Meritfunktion) bilden, deren Ableitung nach der Temperatur einen optimalen Arbeitspunkt definiert. Für eine Vielzahl an Mischungen konnte dieser bei ca. 20° C unterhalb  $T_{iso}$  gefunden werden.

Zur Anwendung dieser Methode wurden in der Arbeitsgruppe spezielle FK-Zellen mit einer transparenten Heizschicht hergestellt und der Einfluss der Temperatur durch Messung der Schaltzeiten bestimmt. Die zur Temperaturerhöhung verwendete transparente Heizelektrode bestand aus niederohmigen ITO (100 Ohm/sq), die sich durch Anlegen einer Spannungsdifferenz an gegenüberliegenden Kanten der ITO-Fläche homogen aufheizte. Die Temperatur der Zelle wurde über einen PID-Regler sowie einen aufgeklebten PT100-Widerstand stabilisiert. Die gemessenen Schaltzeiten in Abhängigkeit von der Temperatur für das hochdoppelbrechende Material BL006 (Merck) sind in Abb. 2.16 dargestellt.

Die durchgezogene Linie entspricht der Ausschaltzeit bei einem Phasenhub von  $\lambda$ , die gestrichelte Linie einem Phasenhub von  $\lambda/2$ . Beide Phasenhübe wurden im oberen PSC-Arbeitsbereich (10 V abwärts) generiert. Es ist die starke Temperaturabhängigkeit der Ausschaltzeit zu erkennen, die um eine Temperatur von 80 °C ein Optimum von 6 ms für ein Phasenhub von  $\lambda$  und 3 ms für einen Phasenhub von  $\lambda/2$  erreicht.

### Nematische Zwei-Frequenz-Mischungen

Nematische Zwei-Frequenz-Mischungen sind Flüssigkristalle mit frequenzabhängiger Anisotropie. Die dielektrische Anisotropie  $\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$  ändert hierbei in Abhängigkeit der



**Abb. 2.16:** Gemessene Ausschaltzeiten einer 9  $\mu\text{m}$  dicken Zelle, FK: BL006-Merck bei verschiedenen Temperaturen.

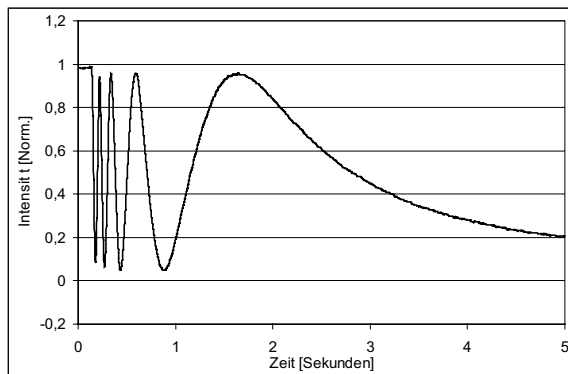
Frequenz des elektrisch angelegten Feldes ihr Vorzeichen. So ist es möglich, das Zurückfallen der Moleküle beim Ausschaltvorgang aktiv durch ein äußeres elektrisches Feld zu beeinflussen [24] [25]. Die von uns verwendete Labor-Mischung MBA-00-3969 (Merck) besteht aus langen, dielektrisch positiven und kurzen, dielektrisch negativen FK-Molekülen. Die Mischung wurde so gewählt, dass eine im Betrag gleich große positive wie negative dielektrische Anisotropie vorherrscht. Ist das anliegende Wechselfeld niederfrequent (1 kHz /  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), so dominieren die langen FKe und richten sich und ihre Nachbarmoleküle zum Feldvektor hin aus. Bei hohen Frequenzen (100 kHz /  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dominieren kurze Moleküle. Da sie eine negative Anisotropie besitzen, drehen sie sich und ihre Nachbarn senkrecht zum Feld.

Zur Bestimmung der Schaltzeiten und zur Entwicklung eines optimalen Ansteuerschemas wurden mehrere Zellen gebaut und wie in Abschn. 2.3.5 beschrieben, vermessen.

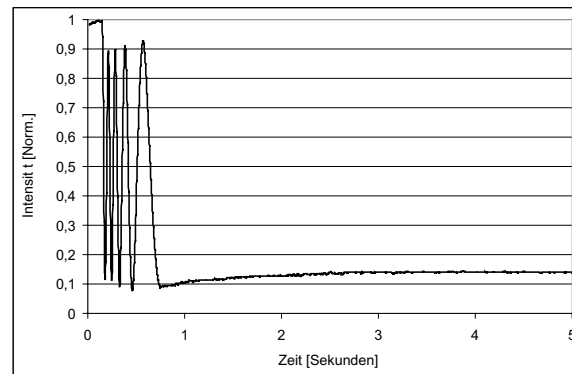
Abb. 2.17 zeigt das gemessene Ausschaltverhalten einer 12  $\mu\text{m}$  dicken Zelle, bei der die angelegte Haltespannung von 10 V (1 kHz) auf 3,5 V (1 kHz) reduziert wurde.

Aufeinander folgende Intensitätsmaxima entsprechen jeweils einem Phasenhub von  $\lambda$ . Die Schaltzeit für einen Phasenhub von ca.  $5\lambda$  liegt hier bei ca. 5 Sekunden (Abb. 2.17). Um die Ausschaltzeit zu verkürzen, kam ein 3-stufiges Ansteuerprofil zum Einsatz, welches mittels einer PC-Karte und einer in *Labview* realisierten Routine erzeugt wurde und in Abb. 2.19 schematisch dargestellt ist.

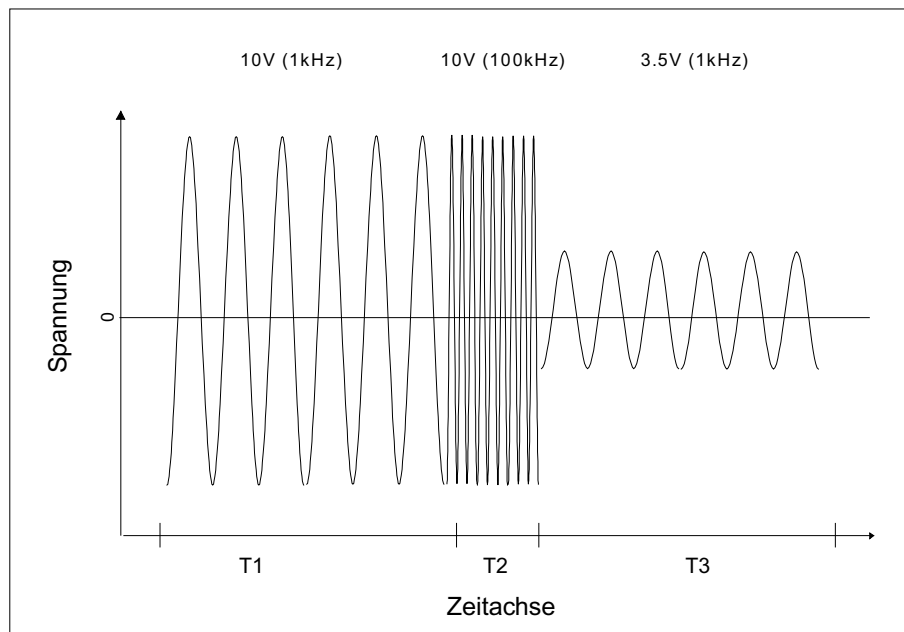
Die Ansteuerung der Zelle geschieht hierbei wie folgt: Die Zelle befindet sich im eingeschalteten Zustand bei einer Haltespannung von (10 V, 1 kHz). Zum Schalten auf ein niedrigeres Spannungsniveau wird ein Wechselfeld hoher Frequenz (10 V, 100 kHz) für einen Zeitraum  $T_2$  angelegt. Dieses hebt die Haltespannung an den dielektrisch positiven FK-Molekülen



**Abb. 2.17:** Schaltzeit für  $1 \lambda$  einer DFN-Zelle ohne aktive Unterstützung des Ausschaltvorgangs.



**Abb. 2.18:** Schaltzeit für  $1 \lambda$  einer DFN-Zelle mit aktiver Unterstützung des Ausschaltvorgangs.

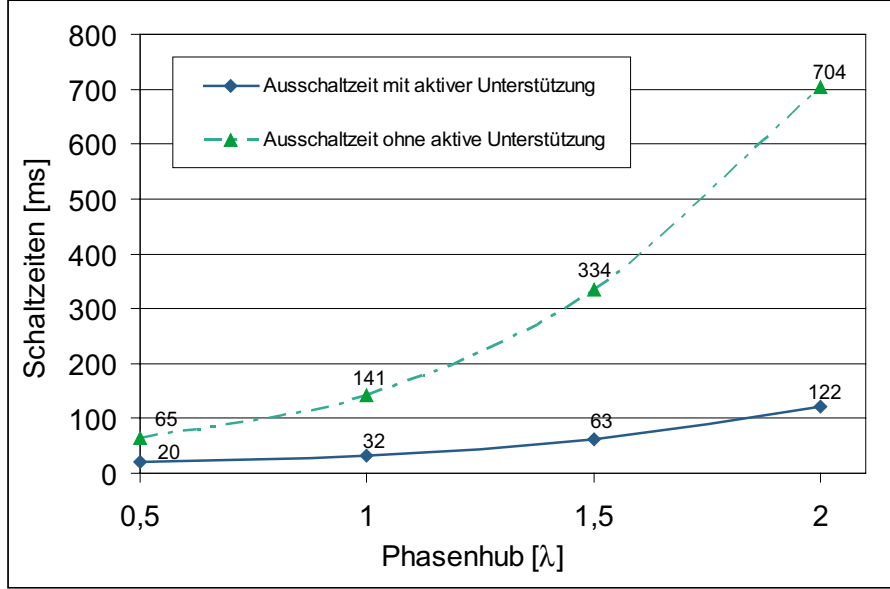


**Abb. 2.19:** Angelegtes Spannungsprofil zur aktiven Unterstützung des Ausschaltvorganges

auf und beschleunigt den Relaxationsprozess durch die sich nun senkrecht zum Feld drehenden dielektrisch negativen Molekülen. Beim Erreichen des gewünschten Phasenhubs wird auf die dazugehörige Haltespannung (z.B. 3.5 V, 1 kHz) umgeschaltet. Zum Erreichen möglichst kurzer Schaltzeiten muss die Zeit T2 des hochfrequenten Spannungssignals an den Phasenhub angepasst werden. Das Schaltverhalten der beschriebenen FK-Zelle unter Anwendung des in Abb. 2.19 dargestellten Schaltschemas ist in Abb. 2.18 dargestellt.

Durch den Einsatz dieses Ansteuerschemas konnte eine Schaltzeitenreduktion um den Fak-

tor 6.6 von anfänglich 5 Sekunden auf 0.75 Sekunden bei gleichem Phasenhub erreicht werden. Ein Vergleich der gemessenen Schaltzeiten für eine noch dünnere, 9  $\mu\text{m}$  dicke Zelle mit und ohne Verwendung des in Abb. 2.19 dargestellten Ansteuerschemas bei verschiedenen Phasenhüben ist in Abb. 2.20 zu sehen.



**Abb. 2.20:** Ausschaltzeiten bei verschiedenen Phasenhüben für eine DFN-Zelle mit und ohne aktive Unterstützung des Ausschaltvorgangs

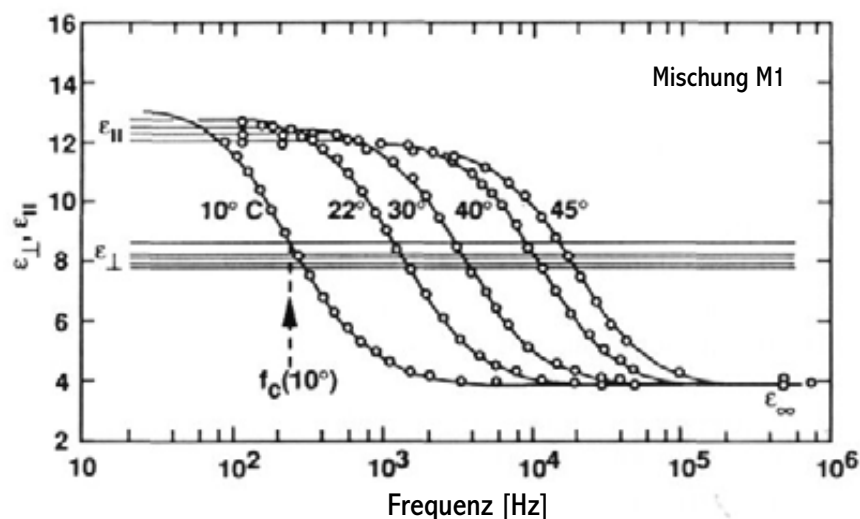
Hier war es möglich, eine Schaltzeitenreduktion um den Faktor 6 schon bei einem Phasenhub von 2  $\lambda$  zu erreichen. Der Graph zeigt deutlich die Verbesserung der Schaltzeit mit zunehmendem Phasenhub, was diese Ansteuermethode vor allem für Elemente mit großen Phasenhüben interessant macht, da dort Schaltzeiten von Sekunden auf wenige 100 ms reduziert werden können.

Die Schaltzeiten können hier wie bei den Nematen unter Verwendung der Erickson-Leslie-Gleichungen unter der Annahme kleiner Auslenkwinkel nach [26] theoretisch ermittelt werden und ergeben sich zu

$$\tau_{rise} = \frac{\gamma_1}{\Delta\epsilon_l E_l^2 - \Delta\epsilon_h E_h^2 - K_{11}(\frac{\pi}{d})^2}, \quad (2.15)$$

$$\tau_{decay} = \frac{\gamma_1}{K_{11}(\frac{\pi}{d})^2 + \Delta\epsilon_h E_h^2} \quad (2.16)$$

Bei großen Temperaturschwankungen ( $\Delta T \geq 30$  °C) ist die Entwicklung einer geeigneten Ansteuerung aufgrund des ausgedehnten Dynamikbereiches der Ansteuerfrequenz schwierig, da die Übergangsfrequenz (Cutoff-Frequenz), wie durch M. Schadt [27] gezeigt, stark



**Abb. 2.21:** Dielektrizität einer Zwei-Frequenz-Mischung in Abhängigkeit von der Temperatur.

von der Temperatur abhängt (siehe Abb. 2.21). Stabilisiert man die Zelle jedoch mit einer Heiz-Elektrode auf eine geeignete Temperatur, z.B.  $T_{stabil} = T_{iso} - 20\text{ °C}$  (siehe Abschn. 2.3.6), wird zum einen das Element von der Außentemperatur bis zu  $T_{stabil}$  unabhängig, zum anderen die Schaltzeit aufgrund der hohen Temperatur reduziert.

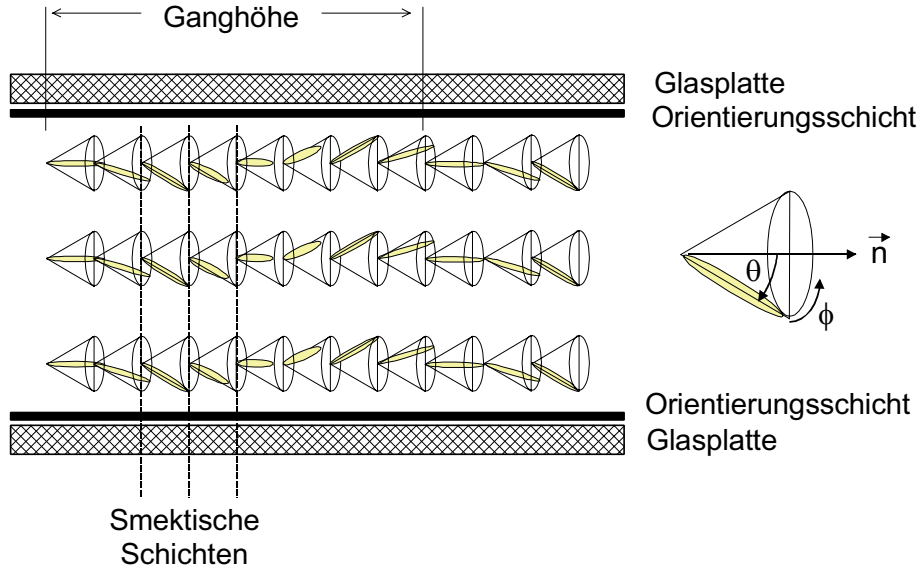
Zwei-Frequenz-Mischungen und die Temperaturmethode sind vor allem bei Elementen mit großem Phasenhub einsetzbar. Da die Untersuchungen dieser Materialklasse erst gegen Ende der Dissertation möglich waren, sind die vorgestellten Elemente noch nicht mit diesen Materialien getestet worden, versprechen jedoch, wie die Einzelmessungen an Frederickszellen gezeigt haben, eine wesentliche Verbesserung der Schaltzeiten.

## 2.4 Ferroelektrische Flüssigkristalle

Denkt man an die Realisierung von noch schnelleren Phasenmodulatoren mit Schaltzeiten zwischen  $250\text{-}500\text{ }\mu\text{s}$  [28], können für ausgewählte Anwendungen ferroelektrische FKe verwendet werden. Diese werden in der Regel zur Amplitudenmodulation eingesetzt, da sich der FK-Direktor nicht wie bei Nematzen zum Feldvektor, sondern senkrecht zu diesem dreht. Einer der wenigen ferroelektrischen FKe, die aufgrund ihrer Mesophase eine variable Phasenmodulation erzeugen, sind die so genannten *Deformed Helical Ferroelectrics Liquid Crystals*.

### 2.4.1 Deformed Helical Ferroelectrics (DHF)

*Deformed Helical Ferroelectrics (DHF)* [29] sind ferroelektrische FK-Materialien in der  $\text{SmC}^*$ -Phase. In dieser Mesophase ordnen sich FKe wie bei einem Nagelbrett in Schichten unter einem Winkel  $\theta$  zur Schichtnormalen an und pflanzen sich von smektischer Schicht zu smektischer Schicht um einen Winkel  $\phi$  gedreht fort (siehe Abb. 2.22).

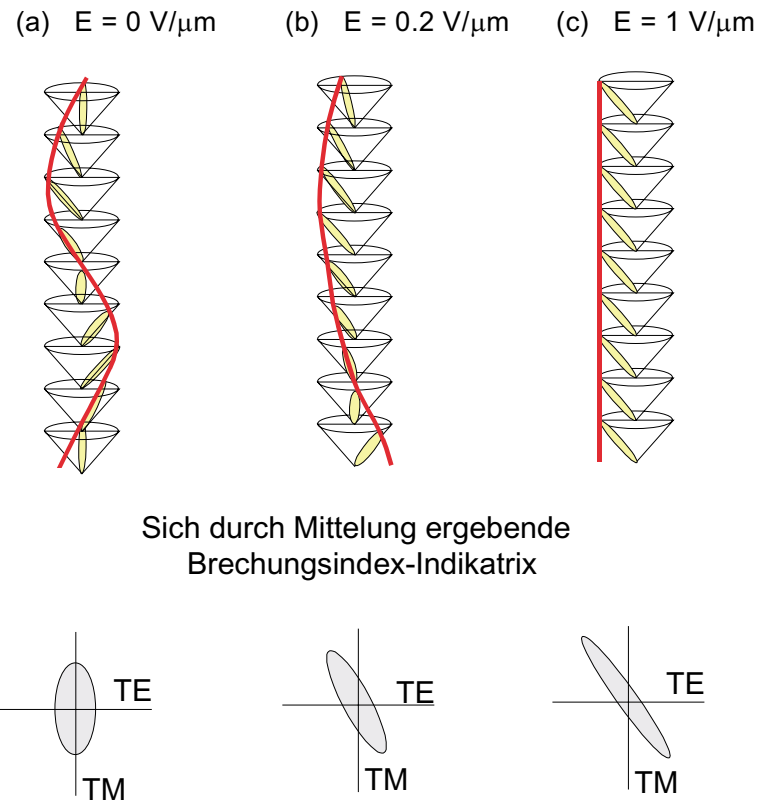


**Abb. 2.22:** Schematische Skizze der FK-Orientierung in einer DHF-Zelle

Das besondere bei DHF-Materialien ist deren kurze Ganghöhe von ca. 150-400 nm, die kleiner der Wellenlänge ist. Hierdurch kommt es durch die entstehende Sub- $\lambda$ -Struktur zu einer Mittelung des Brechungsindex über alle Moleküle. Ohne den Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes ist die sich durch die Schichten fortpflanzende Helixstruktur symmetrisch. Die sich ergebende Brechungsindex-Indikatrix ist in Abb. 2.23 a dargestellt.

Durch Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes wird eine Deformation der Helix und somit eine Änderung der Doppelbrechung sowie eine Drehung der Indikatrixachse (siehe Abb. 2.23 b) erreicht. Bei weiterer Erhöhung kommt es bei einer Feldstärke  $U_{unwind} \approx 0.6 - 0.8 \text{ V}/\mu\text{m}$  zum völligen Entwinden der Helix (Abb. 2.23 c). Der Deformed (oder auch Destorted) Helical Ferroelectrical Effekt beschreibt das Schaltverhalten solcher Materialien.

Der komplexe Schaltvorgang in der helikalen Struktur erzeugt neben einer Phasenmodulation eine Änderung des Polarisationszustandes (Drehung der Indikatrix). Auch kann es zu Streueffekten beim Entwinden und Winden der Helix kommen. Diese in der Regel unerwünschten Effekte stehen jedoch den sehr schnellen Schaltzeiten im 10-50  $\mu\text{s}$ -Bereich gegenüber. Aufgrund der viel versprechenden Schaltzeiten wurde das Material eingehend studiert. Es wurden verschiedene Messverfahren entwickelt und eingesetzt, um die physikalischen und optischen Eigenschaften von DHF-Materialien genauer zu untersuchen. Im

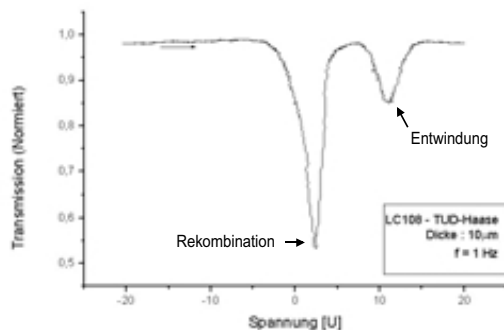


**Abb. 2.23:** Verformung der Helix bei anliegender Spannung und daraus resultierende Indikatrix

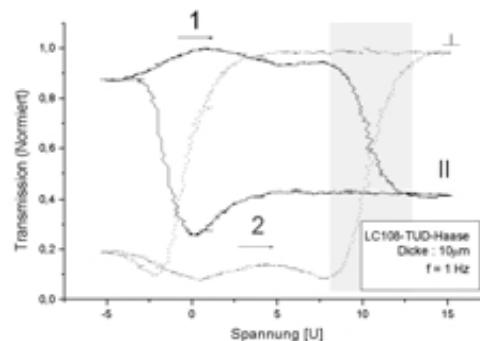
Vergleich zu Nematen wurden folgende Eigenschaften festgestellt:

- Die Orientierung von DHFs ist wegen der komplexen Phasenstruktur ( $\text{SmC}^*$ ) sehr aufwändig und gelingt nicht immer vollständig. Nach dem Befüllen der Zelle im Vakuum werden die FKe durch die Variation der Temperatur orientiert [30]. Hierbei wird die FK-Schicht mehrmals bis in die isotrope Phase erhitzt und während des Abkühlvorgangs bis  $5^\circ\text{C}$  unter  $T_{iso}$  mit unterschiedlichen Wechselspannungen (1 Hz-30 kHz) bei Feldamplituden bis zu  $10 \text{ V}/\mu\text{m}$  orientiert.
- Durch Rotation der Indikatrix kommt es, je nach angelegter Spannung, zu einer Änderung des Polarisationszustandes. Dies führt bei Zellen mit nicht homogenem Potentialverlauf zu lokal unterschiedlichen Polarisationszuständen, welche unter Verwendung eines zweiten Polarisators eine unerwünschte lokale Intensitätsmodulation bewirken.
- Um einen Phasenhub in der Größenordnung von  $1 \lambda$  zu realisieren, ist eine große Brechungsindexänderung notwendig. Diese tritt jedoch erst kurz vor dem vollständigen Entwinden der Helix auf und wird durch starkes Streuen begleitet (siehe Abb. 2.24).

- Das Schaltverhalten ist nicht hysteresefrei. Messungen an verschiedenen Materialien zeigten starke Hysteresen in der optischen Antwort. Abb. 2.25 stellt die gemessene optische Antwort des DHF-Materials FLC-8823 der Fa. Rolic (Prof. Fünfschilling) in Abhängigkeit der angelegten Spannung dar. Die mit dem Material befüllte und orientierte Zelle wurde hierfür unter einem Winkel von  $0^\circ$  (FK-Direktor/Polarisator) zwischen einem Polarisator/Analysator Paar platziert und die beim Durchleuchten mit einem He-Ne-Laser entstehende Intensitätsmodulation aufgezeichnet. Die beiden Umläufe stellen die Intensität einmal für gekreuzte und einmal für parallele Polarisatoren dar. Folgt man den Pfeilen, so erkennt man die Hystereseform. Die maximale Intensität eines Umlaufs stellt jeweils den entwundenen, die Minimalintensität den helixartigen Zustand dar. Der Bereich des Entwindens der Helix ist grau unterlegt.



**Abb. 2.24:** Auftretende Streuung beim Entwindungs- und Rekombinationsprozess.



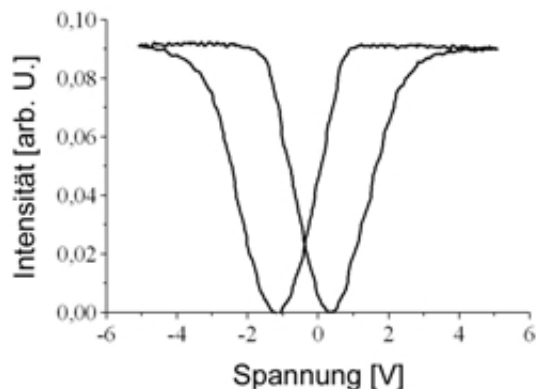
**Abb. 2.25:** Hysterese einer DHF-Zelle zwischen parallelen (1) sowie gekreuzten (2) Polarisatoren.

- Durch geeignete Wahl der Schichtdicken von existierenden Funktionsschichten (ITO, Polyimide, etc.) bzw. durch externe kapazitive Widerstände kann jedoch ein hysteresefreies Schalten realisiert werden. Man spricht vom so genannten V-Shape Mode (Abbildungen 2.26 und 2.27). Das Problem der drehenden Indikatrix bleibt jedoch bestehen.

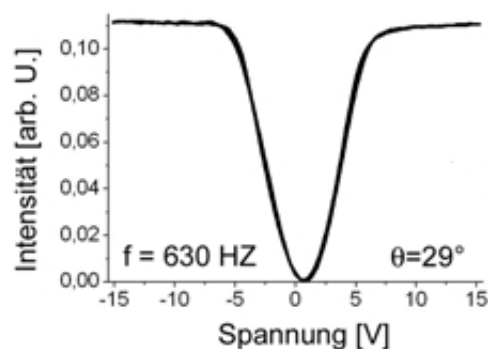
Um eine Phasenhub-Spannungs-Charakteristik auch mit ferroelektrischen FKs messen zu können, wurde ein Aufbau realisiert, der neben der Änderung der Doppelbrechung auch die Drehung der Indikatrixachse und das Streuverhalten der Zelle berücksichtigt. Der Aufbau ist in Abb. 2.28 dargestellt.

Zur Messung kommen zwei Drehpolarisatoren sowie drei Photoelemente zum Einsatz. Das erste Photoelement  $I_1$  hinter dem Polarisator misst die auf die FK-Zelle treffende Lichtintensität und erlaubt mit den Werten von Photoelement  $I_2$  hinter der FK-Zelle, den Lichtverlust durch Streuung zu ermitteln. Das dritte Photoelement  $I_3$  hinter dem Analysator erlaubt die Analyse der Polarisationsänderung und ist unter Berücksichtigung der Streumessung ein Maß für den erzeugten Phasenhub.

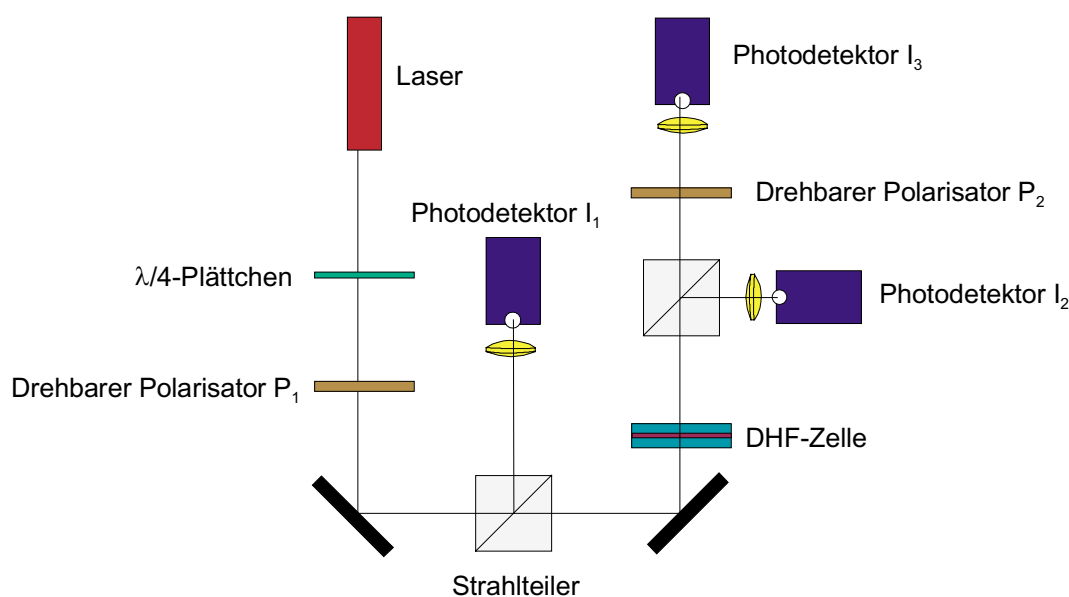




**Abb. 2.26:** Schalten ohne angepasste Funktionsschichten  $\rightarrow$  Hysterese.



**Abb. 2.27:** Hysteresefreies Schalten im sog. V-Shape Mode durch Optimieren der Funktionsschichten.



**Abb. 2.28:** Aufbau zur Vermessung der Streuung, der Indikatrix-Achse sowie des Phasenhubes

Die Ansteuerung der FK-Zelle wie auch die Nachführung der Drehpolarisatoren zur Korrektur der Indikatrixdrehung wurden über einen PC mit einer Motorsteuerkarte und einer I/O PC-Karte realisiert. Die Motorsteuerkarte regelte hierbei die Winkel-Position der Drehpolarisatoren, die I/O-Karte war für die Ansteuerung der FK-Zelle und das Auslesen der Elemente verantwortlich. Ferroelektrische FKe müssen im Gegensatz zu Nematen mit Gleichspannung betrieben werden, da sich die Indikatrix bei Vorzeichenwechsel in die entgegengesetzte Richtung dreht. Um Konvektion und Oberflächenladungen zu unterbinden,

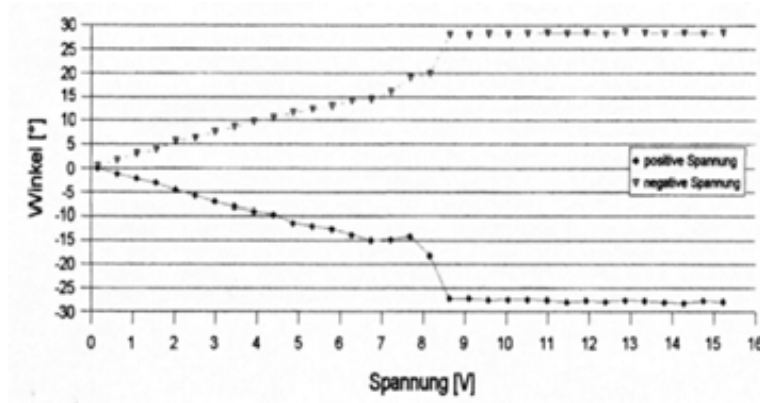
wurden kurzzeitige inverse Spannungsimpulse in das Steuersignal integriert.

Die Messung der Phasenhub-Spannungs-Charakteristik geschieht in zwei Schritten: Zuerst wird die feldabhängige Drehung der FK-Indikatrix bestimmt. Dazu wird das um  $90^\circ$  gekreuzte Polarisator-/Analysator-Paar so gedreht, bis  $I_3$  minimal wird. Der Polarisator ist nun senkrecht zur einer der Indikatrix-Hauptachsen. Nun wird das Polarisator/Analysator Paar um einen Winkel von  $45^\circ$  weitergedreht. Die gemessene Intensitätsänderung an  $I_3$  ist ein Maß für den erzeugten Phasenhub. Für eine Polarisatorstellung  $\alpha = 45^\circ$  zu einer Indikatrixachse ergibt sich durch Umformen von Gleichung 2.8 der Phasenhub aus

$$\phi = 2\arcsin\left(\sqrt{\frac{I_3}{I_2}}\right) \quad (2.17)$$

Zur Bestimmung des Phasenhubs wird die Ansteuerspannung der Zelle schrittweise erhöht und die Intensitätsmodulation nach dem obigen Verfahren aufgezeichnet.

Das Ergebnis der Winkelmessung der Indikatrix ist in Abb. 2.29 dargestellt.

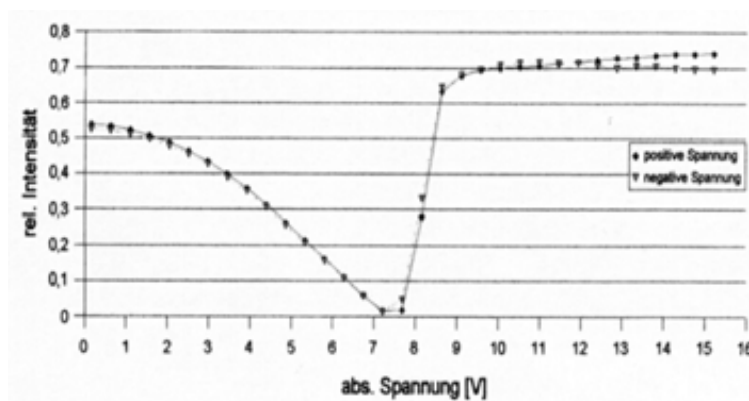


**Abb. 2.29:** Drehung der Indikatrix bei verschiedenen Ansteuerspannungen

Man erkennt einen linearen Zusammenhang zwischen Ansteuerspannung und Drehwinkel. In der Nähe von 7 V kommt es zu einem deutlichen Winkelsprung. Dieser ist auf das eintretende Entwinden der Helixstruktur zurückzuführen.

Die am Photodetektor  $I_3$  nach Ausrichtung der Polarisatoren auf  $45^\circ$  zur Direktorachse und nach Abzug der Streuung  $I_2$  gemessene Intensität ist in Abb. 2.30 dargestellt. Es ist zu sehen, dass bis zur Entwindung der Helix bei  $U_{unwind} \approx 7.5 \text{ V}$  eine Intensitätsmodulation auftritt, welche nach 2.17 einer Phasenmodulation von ca.  $\lambda/2$  entspricht. Zum Testen der Materialien wurden binäre ADLC-Linsen auch mit ferroelektrischen FKEN (siehe Abschn. 4.4) realisiert. Durch dessen Einsatz konnten die Schaltzeiten von 10 ms bei Nematosen auf 0.3 ms reduziert werden. Aufgrund der Streuung war die Fokuseffizienz einer binären ferroelektrischen ADLC-Linse (12-16 %) im Vergleich zu einer binären nematischen ADLC-Linse (16-23 %) um ca. 30 % geringer. Die vorgestellten Messungen zur Phasenhubbestimmung

sowie die Entwicklung der Analyse- und Ansteuersoftware wurde im Rahmen einer begleiteten Diplomarbeit [17] durchgeführt und sind dort im Detail erläutert.

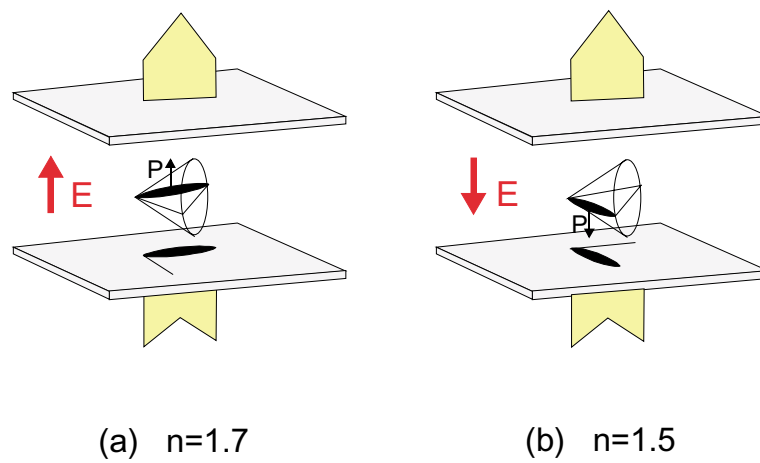


**Abb. 2.30:** Gemessener Intensitätsverlauf am Photodetektor  $I_3$  nach Abzug der Streuung  $I_2$  und Ausrichtung der Polarisatoren  $45^\circ$  zur Direktorachse

## 2.4.2 Oberflächenstabilisierte ferroelektrische Flüssigkristalle (SSFLC)

Der *Surface-Stabilized-Ferroelectric-Liquid-Crystal-Effekt (SSFLC)* [31] ist ein bistabiler, aber dafür sehr schneller Schaltmodus in ferroelektrischen FKen. Effekte wie Streuung oder Hysterese treten nicht auf. Zum Schalten eines Phasenhubs von  $\lambda/2$  können Schaltzeiten unterhalb einer  $\mu s$  [32] realisiert werden. FKe in der  $SmC^*$  Phase bilden in der Regel eine helikale Struktur mit dessen Hauptachse parallel zu den Zellwänden aus. Bei sehr dünnen Zellen (Zelldicke  $\leq 2\mu m$ ) wird die helikale Struktur durch die starken Randanbindungen unterdrückt. Die FKe lagern sich wie Nematosen parallel zueinander, aber im Winkel  $\theta$  zur helikalen Hauptachse an (Abb. 2.31).

Durch den senkrecht zur Längsachse stehenden Polarisationsvektor  $P$  ist es möglich, durch ein von außen angelegtes Feld alle Moleküle auf ihrem Konus von links nach rechts (von  $-x$  nach  $+x$ ) zu schalten. Dieser Effekt ist bistabil. Betrachtet man die Zelle aus der  $Z$ -Richtung, entspricht dieser Schaltvorgang dem Drehen einer planaren nematischen FK-Zelle um den Winkel  $2\theta$ . Liegt die Polarisationsrichtung des eingestrahlten Lichtfeldes parallel zu einer der Molekülhauptachsen, so lässt sich bei Materialien mit einem Konuswinkel von  $\theta = 22.5^\circ$  eine reine Phasenmodulation erzielen, wobei zwischen den beiden Brechungsindizes  $n_e$  und  $n_o$  sehr schnell hin- und hergeschaltet werden kann. Die Phasenmodulation bleibt wegen des bistabilen Schaltmodus auch im ausgeschalteten Zustand erhalten. Solche Zellen erlauben die Realisierung sehr schneller binärer Phasenmodulatoren und können überall dort eingesetzt werden, wo nur zwischen zwei Funktionen hin- und hergeschaltet werden muss (2 Foki-Linse, ein-/ausschaltbare DOE's, binärer Strahlableiter).



**Abb. 2.31:** Schematische Darstellung der beiden Schaltzustände und der daraus resultierenden Brechungsindexänderung

ker, etc.). Die aufgrund der beschränkten Zelldicke ( $\leq 2 \mu m$ ) erreichbaren Phasenhübe von  $\leq \lambda/2$  sowie die aufwändigen Fertigungstechnologien dünner Zellen machen solche Elemente jedoch nur für Spezialanwendungen interessant und wurden aus diesem Grund nicht eingehender studiert.

### 3 Herstellungstechnologien

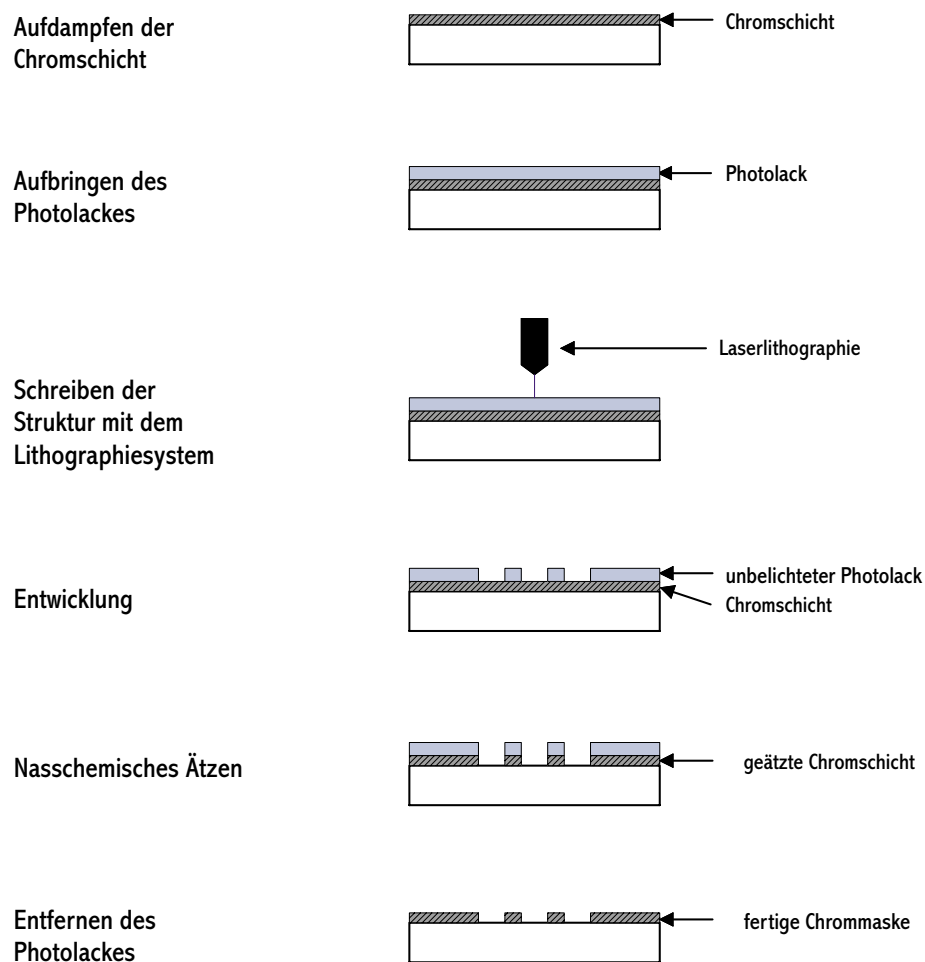
Das Arbeitsgebiet *Adaptive Optiken unter Verwendung von Flüssigkristallen* wurde 1998 am Institut für Angewandte Physik mit Beginn dieser Promotion ins Leben gerufen. Ein Schwerpunkt der Arbeit lag daher in der Erarbeitung von Grundlagen sowie der Entwicklung geeigneter Herstellungstechnologien zur Fertigung der in den folgenden Kapiteln vorgestellten FK-Elemente.

Die Herstellungsverfahren sind denen der FK-Displays ähnlich, mussten jedoch zur Herstellung von Einzel-Elementen deutlich abgewandelt, zum Teil völlig neu entwickelt werden. Die Beschichtungsprozesse wie das Aufbringen von Orientierungsschichten sowie von Photolack konnten mittels Spincoating, die Beschichtung von Leit- und Antireflexschichten mittels Elektronenstrahlverdampfen und Sputtern durch kommerzielle Geräte und deren Optimierung auf die erforderlichen Schichtparameter realisiert werden. Für das Befüllen der Zellen unter Vakuum, die Bearbeitung der Orientierungsschichten sowie für die Zellmontage wurden eigens Geräte entwickelt, die auf die Erfordernisse zur Herstellung der adaptiven FK-Elemente zugeschnitten waren. Ein weiteres Arbeitsgebiet war die Weiterentwicklung des im Hause vorhandenen Laserlithographiesystems. Das in einer Promotion [33] und in zwei Diplomarbeiten [34] [35] entstandene Lithographiesystem zur Herstellung diffraktiver optischer Elemente konnte durch die Implementierung eines Vektormodus zum Schreiben von Elektrodenstrukturen ausgebaut werden. Zur Herstellung und Entwicklung einlagiger und mehrlagiger Elektrodenstrukturen sind eine Reihe von Lithographie-, Entwicklungs- und Ätzschritten nötig. Jeder dieser Schritte erfordert eine Kalibrierung und Optimierung auf bestmögliche Prozessparameter. Vor allem beim aufwändigen Liftoff-Prozess waren eine Menge von Versuchsreihen zur erfolgreichen Herstellung zweilagiger Elektrodenlayouts erforderlich.

Die herstellungsrelevanten Aspekte sowie die entwickelten Verfahrensschritte sind Gegenstand des folgenden Kapitels. Hierzu gehören die Herstellung der Elektrodenstrukturen mittels Laser- und Photolithographie einschließlich der dazugehörigen nasschemischen Ätz- und Entwicklungsprozesse, die Herstellung der benötigten Leit- (ITO, Chrom, Baytron P), Orientierungs- (Polyimide, Lecithin, etc.) sowie Antireflexschichten (Magnesiumfluorid, Siliziumoxid) und die Fertigung der FK-Zellen. Die Etablierung und Weiterentwicklung der Herstellungstechnologien zum Bau von FK-Elementen erforderten eine mehrjährige Aufbauarbeit und waren Inhalt von begleiteten Diplomarbeiten [17] [18] [36] [37] [38].

### 3.1 Herstellung der Elektrodenstrukturen

Zur Herstellung der Elektrodenstrukturen wurden für die verschiedenen FK-Elemente Chrommasken lithographisch erzeugt, deren Struktur in einem weiteren Schritt mittels Photolithographie auf ITO-Substrate übertragen wurde. Abb. 3.1 zeigt den Ablauf der zur Herstellung von Chrommasken notwendigen Arbeitsschritte, auf die im folgenden im Detail eingegangen werden soll.



**Abb. 3.1:** Arbeitsschritte zur Herstellung von Chrommasken

### 3.1.1 Herstellung der Chrom- und ITO-Substrate

Zur Herstellung von Phasenmodulatoren werden Elektroden aus transparentem, leitfähigem Material benötigt. Hierbei hat sich Indium-Zinn-Oxid (ITO) als eines der am besten geeigneten Materialien herauskristallisiert. Dieses wird mittels Elektronenstrahlverdampfen in einer Vakuumkammer bzw. über einen Sputterprozess auf Quarzglas bzw. Ionen-reduziertes Displayglas aufgebracht. Beide Beschichtungsanlagen (siehe Abb. 3.2 und 3.3) waren bereits im Hause verfügbar und wurden auf die Herstellung homogener Schichten mit hoher Transparenz und Leitfähigkeit weiterentwickelt.

Beide Geräte wurden zur Herstellung von ITO-Substraten umgerüstet und kalibriert, die Sputteranlage mit einem Schwingquarz zur Schichtdickenmessung, der Elektronenstrahlverdampfer mit einer im Vakuum rotierenden Aufnahmevorrichtung ausgestattet.



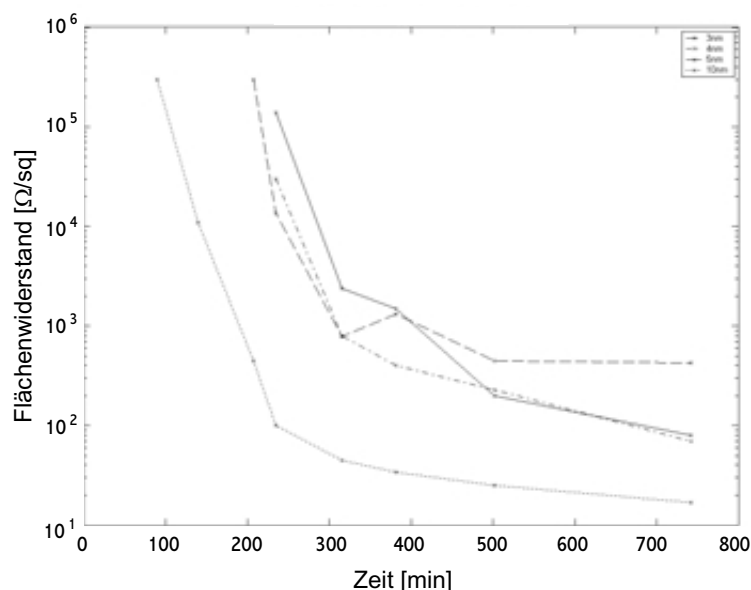
**Abb. 3.2:** Vakuumkammer mit Elektronenstrahlverdampfer



**Abb. 3.3:** Sputteranlage SCD-050 der Fa. Balzers mit aufgestelltem ITO-Target

Durch Rotation des Substrates während des Aufdampfprozesses war es möglich, die erforderliche Homogenität auch bei dünnen Schichten (3-70 nm) zu erreichen. Die Anpassung der Leitfähigkeit sowie die Transparenz der ITO-Schicht waren durch Kontrolle des Sputterprozesses möglich. Zur direkten Erzeugung transparenter ITO-Flächen, die keine weitere Strukturierung benötigen (Ground-Elektroden, CLC-Linse), wurde während des Prozesses Sauerstoff zugeführt. Die so erhaltenen volloxidierten Schichten waren mechanisch sehr stabil und zeichneten sich durch eine hohe Resistenz gegenüber Ätzlösungen aus. Es konnten Schichten mit einer Reintransmission (ohne Reflexionsverluste des Trägersubstrates) größer 92 % bei Schichtwiderständen kleiner 100 Ohm/sq realisiert werden. Teiloxidierte ITO-Schichten wurden ohne Zufuhr von Sauerstoff realisiert und waren wegen ihrer guten Ätzbarkeit besonders gut zur Strukturierung geeignet. Die Transparenz und Leitfähigkeit dieser Schichten konnte durch den nachfolgenden Temper-Prozess kontrolliert werden. Abb. 3.4 zeigt die von der Temper-Dauer gemessene Abhängigkeit des ITO-Widerstands für verschiedene ITO-Schichtdicken. Die Messungen wurden jeweils nach einer 10 min.

Abkühlphase des Substrats vorgenommen.



**Abb. 3.4:** ITO-Flächenwiderstände bei verschiedenen Schichtdicken und unterschiedlichen Temper-Zeiten. Temper-Temperatur = 250 °C

Zur Beschichtung kleiner Flächen ( $\leq 1 \text{ cm}^2$ ), bei denen die Homogenität der Schichtdicke unkritisch war (z.B. CLC-Linse), kam der einfacheren Handhabung wegen eine Sputteranlage zum Einsatz. Die Dicke der aufgetragenen Schichten wurde bei beiden Verfahren über elektrische Messung der Resonanzfrequenz parallel beschichteter Schwingquarze bestimmt. Neben ITO-Schichten wurden Chrom- und Antireflexschichten hergestellt. Die Schichtdicke des zur Herstellung von Masken und Elektrodenstrukturen verwendeten Chroms lag, wenn nicht gesondert erwähnt, bei ca. 100 nm. Vor dem Beschichtungsprozess wurden die Substrate mit einer 2 %-igen Kollodium-Diethylether-Lösung gereinigt. Der hierbei durch das Verdunsten des Lösungsmittels entstehende Film wurde kurz vor Schließen der Vakuumkammer entfernt. So konnten, trotz nicht immer staubfreier Räume, Schichten hoher Qualität hergestellt werden.

### 3.1.2 Strukturierung der Elektroden mittels Laserlithographie

Das zur Herstellung von diffraktiven optischen Elementen (DOEs) in der Arbeitsgruppe entwickelte Laserlithographiesystem wurde im Rahmen zweier Diplomarbeiten [39] [40] auf das Schreiben vektorieller Strukturen erweitert.

Der für DOEs verwendete Bitmap-Modus konnte bei den benötigten Strukturgrößen von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  (Auflösung  $1 \mu\text{m}$ ) wegen der anfallenden hohen Datenmengen ( $2.5 \cdot 10^9$  Bits) und der langen Schreibzeiten (mehrere Tage) nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden. Durch den



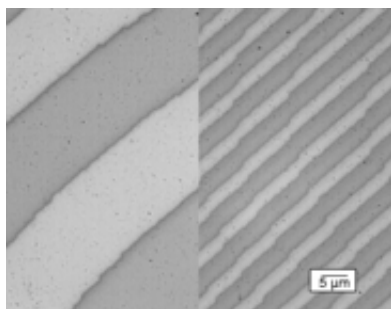


Abb. 3.5: Pixelmodus

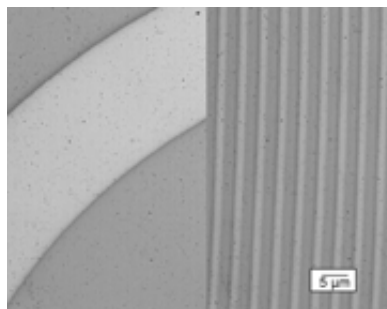


Abb. 3.6: Vektormodus

implementierten Vektormodus konnten die Schreibzeiten um einen Faktor  $\approx 4$  verkürzt werden. Zusätzlich konnten auftretende Diskretisierungsfehler bei Kreissegmenten beseitigt werden (siehe Abb. 3.5 und 3.6). Aufbau und Funktionsweise des Lithographiesystems wurden in vorangegangenen Arbeiten eingehend beschrieben ([34] [39]). Es wird deshalb nur kurz auf wesentliche Größen und den eigentlichen Arbeitsprozess eingegangen. Das Laserlithographiesystem ist in Abb. 3.7 abgebildet, Abb. 3.8 zeigt den schematischen Aufbau.

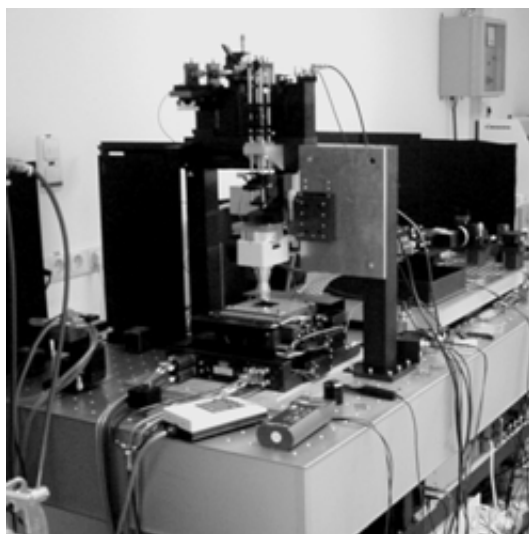


Abb. 3.7: Eingesetztes Laserlithographiesystem

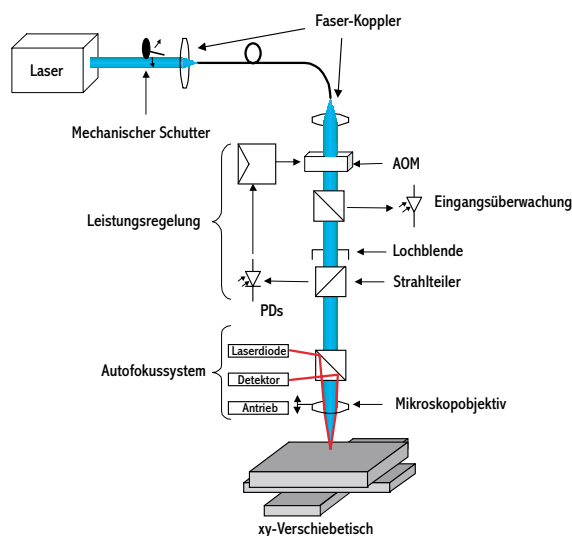


Abb. 3.8: Schematischer Aufbau des Laserlithographiesystems

Ein mit Photolack beschichtetes Substrat wird auf einem Verschiebetisch, dessen Schrittweite 20 nm beträgt, unter dem fokussierten Strahl eines Argon-Ionen-Lasers ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ ) hinwegbewegt. Eine schnelle Computersteuerung kontrolliert die Position der Verschiebeeinheit und moduliert die Intensität des Laserstrahls. Die Fokussierung erfolgt mit einem Mikroskopobjektiv einer N.A. von 0.9, um eine hohe Auflösung der Struktur von unter einem Mikrometer zu erzeugen. Zur Korrektur von Einkopplungsschwankungen wird das Laserlicht über eine Monomodefaser an das System herangeführt und eine aktive Langzeit-Intensitätsreglung mit Photodiode und Regelkreis implementiert. Die schnelle Modulati-

on der Schreib-Intensität erfolgt mittels eines Akusto-Optischen-Modulators, der je nach Ansteuerung einen Anteil des einfallenden Lichts in die erste Beugungsordnung abbeugt und diese zum Belichten nutzt. Um den Abstand des Objektiv-Substrats konstant zu halten, kam ein kommerzielles Laser-Autofokussystem vom Typ *Leica LAF* zum Einsatz. Die Nachführung des Objektivs ist notwendig, da die Fokustiefe bei der blauen Schreibwellenlänge mit dem verwendeten Objektiv nur etwa  $0.6\ \mu\text{m}$  beträgt. Wird die Fokustiefe nicht nachgeführt, kommt es bei Keilfehlern oder Fehlaufgabe des Substrates zu variierenden Spotgrößen ( $\rightarrow$  variierende Leiterbahndicken) sowie zu falschen Belichtungszeiten. Bei der Verschiebeeinheit zum Verfahren der Substrate handelte es sich um einen luftgelagerten positions- und geschwindigkeitsgeregelten Verschiebetisch der Fa. Dover Instruments Corp. Der Antrieb erfolgte durch Linearmotoren, die Positionsbestimmung durch zwei optische Linearencoder LIP-402A der Fa. Heidenhain, deren Signal vom Controller des Verschiebetisches erfasst wird. Dieser enthält einen PID-Regelkreis, welcher die Differenz von Soll- und Ist-Position auf Null ausregelt. Beim Betrieb im Vektormodus sind hier vor allem die Feinabstimmung der PID-Regelung sowie die Ansteuererroutinen von entscheidender Bedeutung. Bevor die in AutoCad entworfenen Strukturen geschrieben werden konnten, mussten sie in ein für die Ansteuerung des Lithographiesystems lesbares Datenformat überführt werden. Hierzu wurde in der Arbeitsgruppe ein Konvertierungstool entwickelt, das bei Budach [39] genauer erläutert wird.

### 3.1.3 Beschichtungs- und Entwicklungsprozesse

Nach der Beschichtung mit Chrom oder ITO und der Reinigung mit einem Aceton-/Isopropanolgemisch wurden die Substrate im Spincoating-Verfahren (Abb. 3.9) mit Photolack beschichtet. Die Dicke des aufgeschleuderten Lackes wird durch die Viskosität des Photolacks und somit durch die Umdrehungszahl bestimmt. Abb. 3.10 zeigt die Abhängigkeit der Schichtdicke der verwendeten Shipley-Lacke bei gegebener Umdrehungszahl. In der Praxis erwies sich eine Umdrehungszahl von rund 3000 U/min ( $t=60\text{ s}$ ) aufgrund der resultierenden Homogenität der Schichten als besonders geeignet.

Die mit Lack beschichteten Substrate werden in einem Ofen für 30 min auf  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Softbake) erhitzt, wodurch das Lösungsmittel entweicht. Zur Einsparung von Schreibzeit kamen je nach Elektrodenlayout sowohl positive wie negative Photolacke zum Einsatz. Als Positivlack, bei dem belichtete Strukturen beim Entwickeln entfernt werden, wurde Shipley Microposit S1805, als Negativlack (inverses Verhalten) Microresist ma-N 1407 verwendet.

Anschließend erfolgt das Ätzen der Chromschicht mit einer Mischung aus Ammonium-Cer-Nitrat und Essigsäure. ITO-Schichten werden mit einer Salz-/Salpetersäure-Lösung geätzt. Die Ätz- und Entwicklungszeiten werden hierbei durch die Konzentration der Lösungen sowie durch die Temperatur beeinflusst. Zur Strukturierung volloxidierter ITO-Schichten wird nach der Belichtung ein Hardbake des Photolackes bei  $115\text{ }^{\circ}\text{C}$  (30 min) durchgeführt, bei dem dieser vollständig polymerisiert wird und somit eine höhere Resistenz gegenüber der Ätzlösung ausbildet. Für Chromsubstrate ist ein Hardbake ungeeignet, da es zur Oxi-

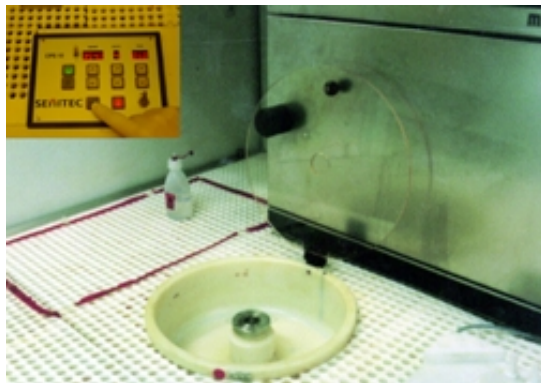


Abb. 3.9: Spincoating-Anlage

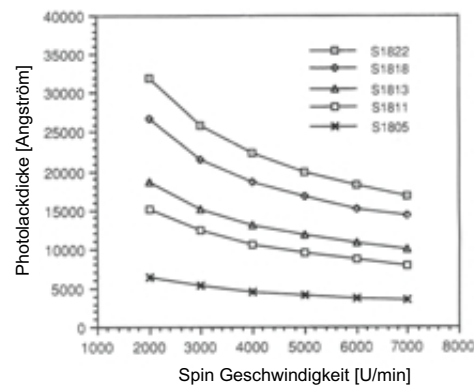


Abb. 3.10: Schichtdicke der S1800-Serie bei verschiedenen Umdrehungszahlen.

dation des frei liegenden Chroms kommt. Nach dem Entwickeln werden die Proben mit destilliertem Wasser abgespült und anschließend mit Stickstoff trocken geblasen.

### 3.1.4 Herstellung einlagiger Elektrodenstrukturen mittels Photolithographie

Da ein direktes Beschreiben der ITO-Substrate aufgrund langer Schreibzeiten nicht sinnvoll war, wurden die Elektrodenstrukturen ausschließlich auf Chrommasken geschrieben und mittels eines nachfolgenden photolithographischen Schrittes auf ITO-Substrate kopiert. Hierzu kam ein Maskaligner MJB3-UV300 der Fa. Karl Suess (Abb. 3.11) zum Einsatz. Der Ablauf des Kopierprozesses ist in Abb. 3.12 dargestellt.

Zum Kopieren wird die Maske über einem mit ITO/Chrom und Photolack beschichteten Substrat positioniert und mittels eines Mikroskopes ausgerichtet. Die Kopie erfolgt in einem Kontaktverfahren, bei dem die unter Vakuum aufeinander gepressten Substrate durch ein paralleles Lichtstrahlbündel ( $\lambda_{Peak} = 330 \text{ nm}$ ) belichtet werden. Nach Entwicklung des Photolackes und dem nachfolgenden Ätzprozess steht so eine Kopie der Chrommaske in Chrom bzw. ITO zur Verfügung.

### 3.1.5 Herstellung zweilagiger Elektrodenstrukturen mittels Lift-off-Prozess

Zur Herstellung zweilagiger Elektrodenstrukturen wird in einem ersten Schritt die untere Elektrodenstruktur aus Chrom mit den in Abschnitten 3.1.4 und 3.1.5 beschriebenen Techniken erzeugt. Anschließend wird diese erneut mit Photolack beschichtet und die zweite Chrommaske mit Hilfe des Maskaligners positionsgenau in den Photolack einbelichtet (siehe Abb. 3.13). Die erreichte Justiergenauigkeit lag dabei im Bereich weniger Mikrometer. Der strukturierte Photolack wird entwickelt und anschließend in einer Sputteranlage mit



**Abb. 3.11:** Maskaligner

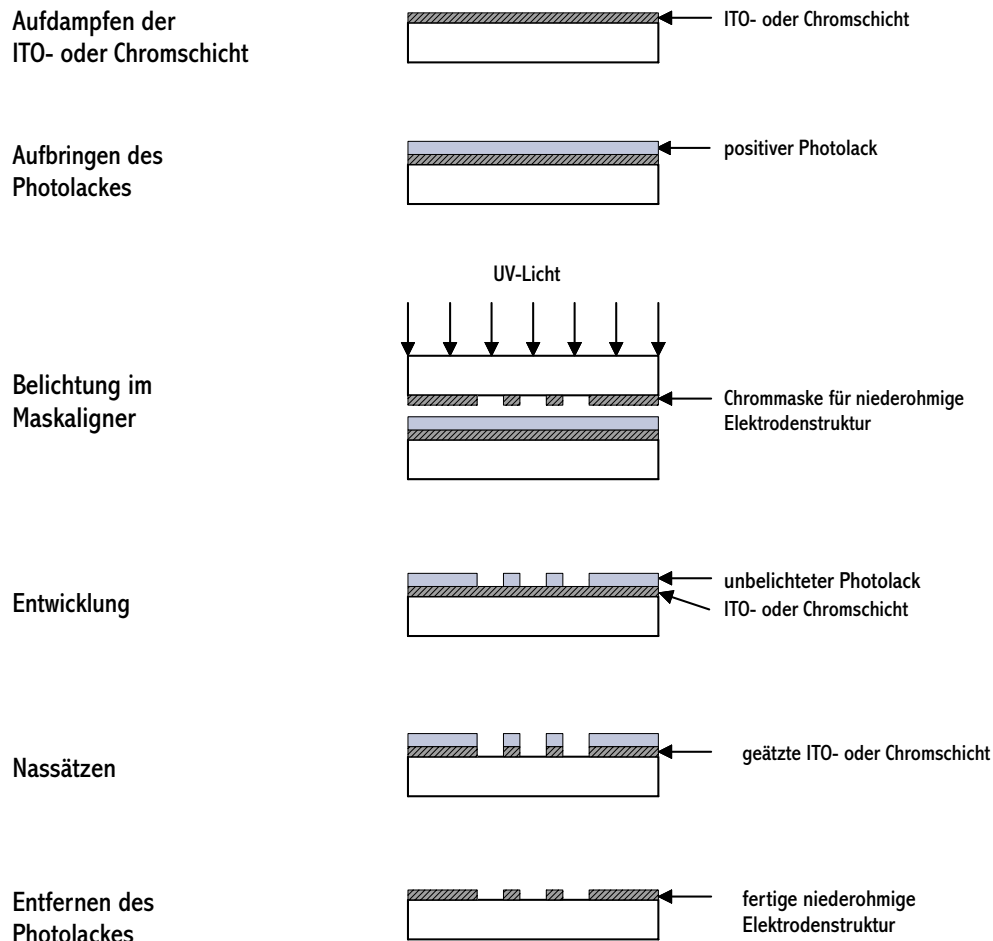
der gewünschten zweiten Schicht (hochohmiges ITO) versehen. Durch die diffuse Beschichtung beim Sputtern kam es zu keinen Abschirmungen, wie sie bei gerichteten Verfahren (Elektronenstrahlverdampfen) auftreten. Durch nachfolgendes Entfernen des Photolacks mit Aceton im Ultraschallbad bleibt das mit der unteren Schicht (Chrom) in Kontakt gekommene ITO auf dem Substrat zurück und bildet so die zweite Elektrodenschicht.

## 3.2 Herstellung der Flüssigkristallzellen

Die hier eingesetzten Fertigungsverfahren wurden aus industriellen Prozessen abgeleitet, mussten jedoch für den Bau von Einzelkomponenten deutlich modifiziert werden. Hierzu wurden Geräte entwickelt, die für die Montage und das Befüllen der Zellen notwendig waren. Zur Orientierung von FKen werden die fertigen Elektrodensubstrate sowie homogen beschichteten ITO-Substrate mit einer Orientierungsschicht versehen und mit einer Haltevorrichtung gegeneinander justiert sowie lokal fixiert. Das Befüllen der Zelle mit FKen geschieht kapillar und ist je nach Material- und Zelltyp direkt oder unter Vakuum möglich. Abschließend wird die Zelle mit Epoxid-Harz Kleber versiegelt und geeignet kontaktiert. Die einzelnen Prozessschritte werden im folgenden erläutert.

### 3.2.1 Orientierungsschichten

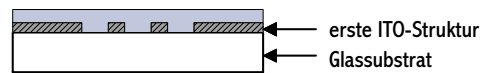
Um eine spätere einheitliche Ausrichtung der FKs in der Zelle zu erreichen, werden die fertiggestellten Elektrodensubstrate durch Spincoating mit einer Orientierungsschicht ver-



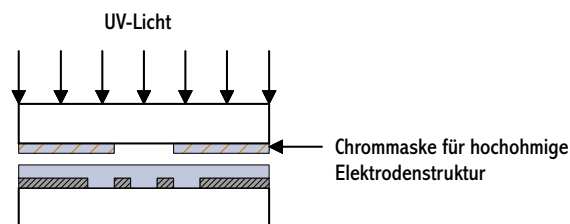
**Abb. 3.12:** Arbeitsschritte zur Herstellung einer Elektrodenstruktur aus ITO

sehen. Zur planaren Orientierung kam das Polyimid ZLI-2650 (Cyclopentanon) der Fa. Merck zur Anwendung, das in einer 0.3 - 3 % Lösung im Spincoating Verfahren bei 3000 U/min eine Minute lang aufgeschleudert wird. Der Film wird anschließend im Ofen (95 °/30 min) getrocknet sowie mittels eines speziellen Samttuches mehrmals in eine Richtung gerieben. Das für diesen Zweck entwickelte Reibegerät ist in Abb. 3.14 dargestellt. Für eine homeotrope Orientierung wurde Lecithin verwendet und mit Spincoating aufgebracht. Ein Reiben der Schichten ist aufgrund der späteren senkrechten Ausrichtung der Moleküle

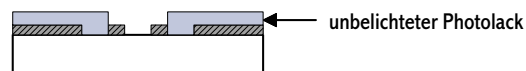
Aufbringen des  
Photolackes



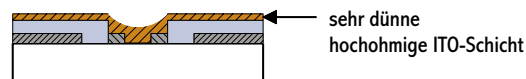
Justierung der  
2. Maske im  
Maskaligner und  
Belichten



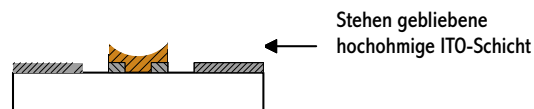
Entwicklung des  
Photolackes



Aufdampfen der  
2. ITO -Schicht



Entfernen des  
Photolackes mit Aceton in  
einem Ultraschallbad



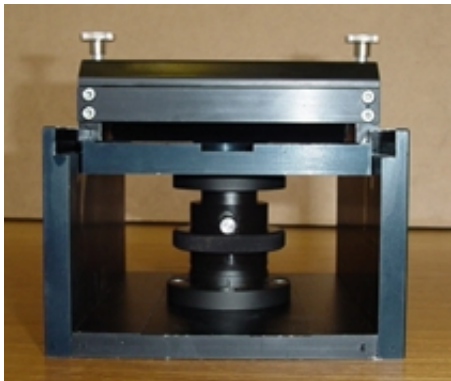
**Abb. 3.13:** Arbeitsschritte zur Herstellung einer zweiten Elektrodenstruktur durch Lift-off-Verfahren

nicht notwendig.

### 3.2.2 Montage und Befüllen der Zellen

Die Glasplatten werden mit einem Epoxy-Klebstoff (UHU Endfest 300) auf dem in Abb. 3.15 gezeigten Montagetisch verklebt.

Zur Vermeidung eines elektrischen Kontaktes zwischen den sich gegenüberliegenden Elektrodenflächen kamen Kugel- und Folienspacer mit Dicken von 3-50  $\mu\text{m}$  zum Einsatz. Nach



**Abb. 3.14:** Reibeanlage zum Behandeln der Orientierungsschicht. Hierbei wird durch mehrmaliges, gerichtetes Reiben eine Vorzugsrichtung in der Schicht erzeugt

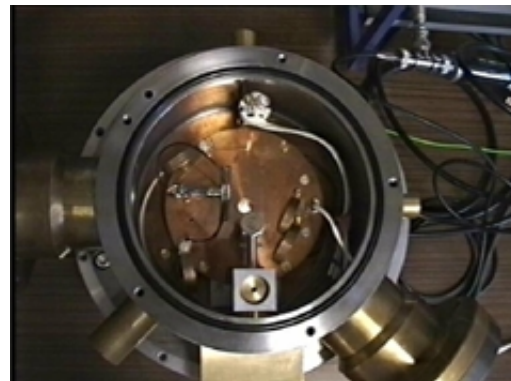


**Abb. 3.15:** Montagetisch zum Verkleben der Zellen. Mit Hilfe von Kunststoffstäben kann ein gleichmäßiger Druck ausgeübt werden, der Keilfehler beim Verkleben minimiert

dem Verkleben wird die Zelle über Kapillarkräfte mit FK befüllt. Um Lufteinschlüsse zu vermeiden, wurde dieser Schritt im Vakuum durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Vakuumkammer (Abb. 3.16) entwickelt, welche ein Polarisationsmikroskop mit Beleuchtungseinheit zur Prozesskontrolle sowie eine temperaturgeregelte Heizvorrichtung zur Orientierung ferroelektrischer FKe (Abb. 3.17) enthält. Das Gerät wurde so konzipiert, dass mit Hilfe einer mechanischen Kippvorrichtung die FKe direkt an die Glaskante herangeführt werden konnten.



**Abb. 3.16:** Gesamtanlage

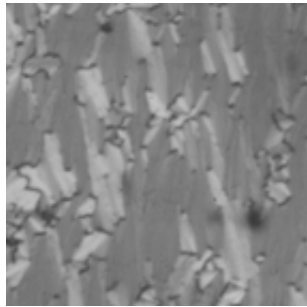


**Abb. 3.17:** Vakuumkammer

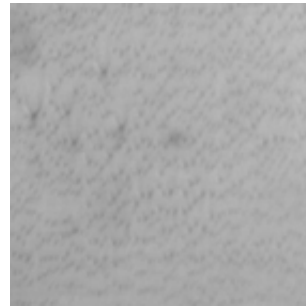
Die Heizvorrichtung wurde benötigt, da bei ferroelektrischen FKen eine homogene Orientierung der SmC\*-Phase nur durch einen aufwändigen Orientierungsprozess möglich ist, wobei der FK durch Temperaturänderung mehrfach von der SmA-Phase in die isotrope sowie in die SmC\*-Phase überführt wird. Zusätzlich wird ein starkes elektrisches Wechselfeld variabler Amplitude und Frequenz an die Zell-Elektroden angelegt. Das Ergebnis eines solchen Orientierungsprozesses ist in Abb. 3.18 und 3.19 dargestellt. Einzelheiten zur



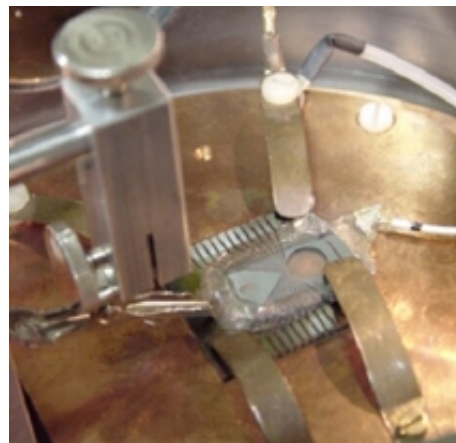
Ansteuerung und Orientierung von DHF-Materialien finden Sie unter [17].



**Abb. 3.18:** Ferroelektrische FKe vor dem Orientierungsprozess



**Abb. 3.19:** Ferroelektrische FKe nach dem Orientierungsprozess



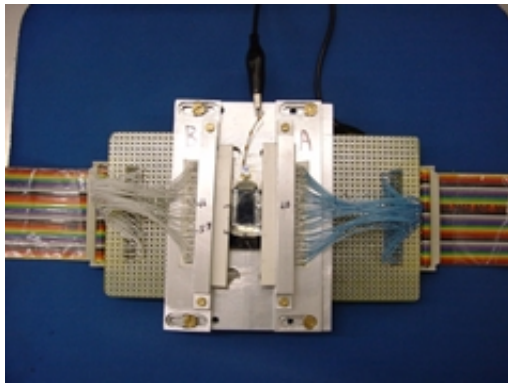
**Abb. 3.20:** Vorrichtung zum Befüllen einer Zelle im Vakuum

### 3.2.3 Kontaktierung

Zur Kontaktierung der Zellen kamen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Bei einer geringen Anzahl von Elektroden können die Kontakte durch Auflöten der Zuleitungen hergestellt werden. Bei Elementen mit mehreren Elektroden wie bei der ADLC-Linse (64 Elektroden) kam ein Thermo-Kompressiv-Verfahren unter Verwendung eines Kontaktstreifens mit anisotroper Leitfähigkeit (ACF-Band) zur Anwendung. Hierdurch ist es möglich, große Arrays von Elektroden platzsparend zu kontaktieren. Nachteil dieser Methode sind die geringe Wiederverwendbarkeit sowie die Kosten für die Anfertigung der Kontaktierungsplatinen (Abb. 4.15). Für die Prototypenherstellung kamen daher eigens entwickelte Varianten aus PCI- wie auch CHAMP-Steckern zum Einsatz. Abbildungen 3.21 und 3.22 zeigen zwei eingesetzte Konstruktionen, um mehradrige Elektrodenstrukturen (z.B. EADLC-Linse (Abschn. 6.1)) zu kontaktieren. Der Elektrodenabstand der Zuleitungen auf den Glassubstra-



ten musste hierbei den verschiedenen Steckergeometrien angepasst werden, was je nach verwendetem Steckertyp ein Re-Design der Elektrodenstruktur und den Bau neuer Zellen zur Folge hatte.



**Abb. 3.21:** Kontaktierung einer FK-Zelle mittels zwei PCI-Steckerhälften



**Abb. 3.22:** Kontaktierung einer FK-Zelle mittels zwei CHAMP-Steckern der Fa. Tyco-Electronics



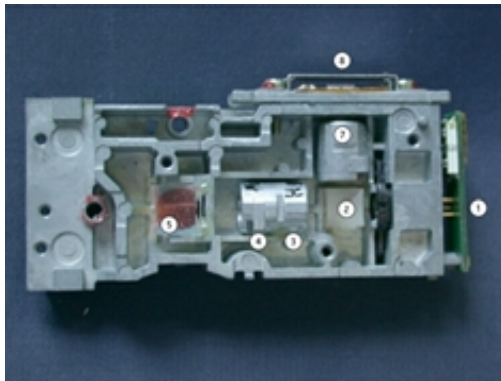
## 4 Optisches DVD-Modul mit axialem Doppelfokus

In Zusammenarbeit mit der Deutschen Thomson Brandt wurden im BMBF-Leitprojekt *Neuer optischer Schreib-/Lesekopf für die optische Disk* von Anfang 1998 bis Ende 2000 adaptive optische FK-Elemente entwickelt, um die Leistungsfähigkeit und die Funktionalität optischer DVD-Laufwerke zu erweitern. Dabei entstand in Zusammenarbeit mit Projektpartnern ein neuartiger optischer Abtaster (Pickup) für den gleichzeitigen Zugriff auf beide DVD-Datenebenen. Die Konzeption und die Entwicklung des Optikmoduls waren Gegenstand der Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe Mikrooptische Systeme, die dort eingesetzten FK-Linsen im Speziellen Gegenstand der vorliegenden Dissertation. Die Designparameter der FK-Linsen standen in direktem Zusammenhang mit den Parametern und Randbedingungen, die durch die DVD-Laufwerke vorgegeben wurden. Dieses Kapitel gibt daher zunächst einen kurzen Einblick in die Funktionsweise von DVD-Laufwerken, bevor auf das neue Konzept eingegangen wird. Die zur Fokuspachregelung entwickelten FK-Linsen werden in den Abschnitten 4.3 und 4.4 ausführlich erläutert.

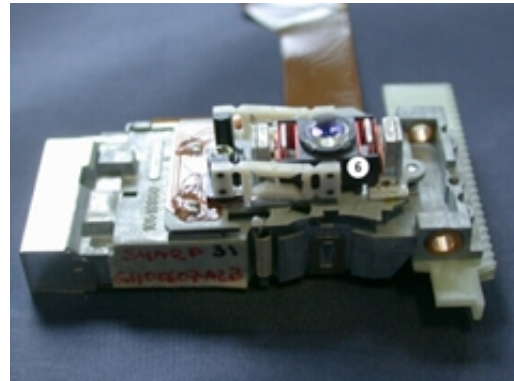
### 4.1 Aufbau eines konventionellen optischen DVD-Abtasters

DVDs haben sich seit der Markteinführung 1999 mittlerweile zu einem stark verbreiteten Speichermedium im Video- und Datenbereich entwickelt. Ihre im Vergleich zur CD bis zu 30-fach höhere Speicherkapazität von bis zu 17 Gigabyte wurde durch Reduktion der Lese-/Schreibwellenlänge, Verkleinerung der Pit- und Spurbreiten, Erhöhung der numerischen Apertur der Objektivlinse, Einführung einer zweiten Datenschicht sowie die optionale Verwendung beider Seiten der Disk erreicht [41]. Diese hohe Kapazität macht es erstmals möglich, Spielfilme in ausgezeichneter Qualität auf einer optischen Disk zu speichern. Die zentrale Einheit eines DVD-Laufwerkes ist das optische Abtastsystem, wie es in den Abbildungen 4.1, 4.2, 4.3 dargestellt ist.

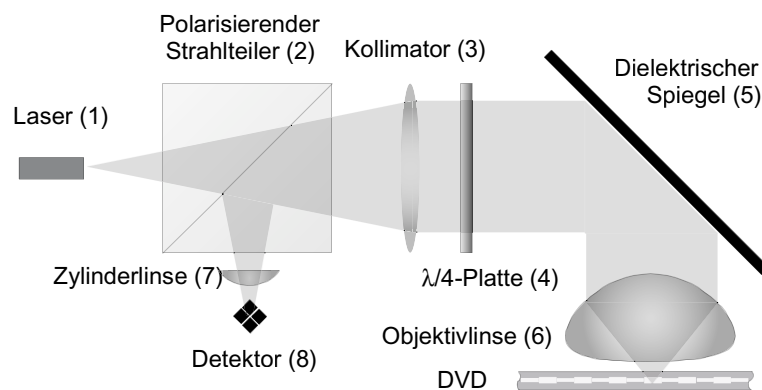
Licht einer roten Laserdiode (1) der Wellenlänge 650 nm wird nach einem polarisierenden Strahlteiler (2) mit einem Kollimator (3) parallelisiert und nach einer  $\lambda/4$ -Platte (4) über einen dielektrischen Spiegel (5) mit Hilfe einer Objektivlinse (6) der N.A. = 0.6 auf die Datenschicht der Disk fokussiert. Ein induktiv arbeitender Aktuator (6) erlaubt durch Verschieben der Objektivlinse die Anpassung der Fokustiefe bezüglich der Fokustiefe und Spur-



**Abb. 4.1:** Blick in das Innere eines DVD-Abtastkopfes



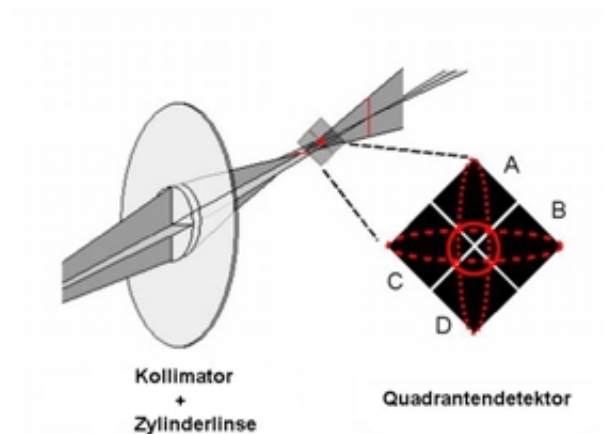
**Abb. 4.2:** Blick auf den Aktuator mit Objektivlinse



**Abb. 4.3:** Schematischer Aufbau eines CD-Abtasters

position. Das durch die Pitstrukturen modulierte und von der Disk reflektierte Licht wird auf dem Rückweg durch den pol. Strahlteiler (2) ausgekoppelt (das  $\lambda/4$ -Plättchen dreht die Polarisation des Lichtes bei zweifachem Durchgang um  $90^\circ$ ) und unter Verwendung einer Zylinderlinse auf den Detektor (8) fokussiert. Durch den so erzeugten astigmatischen Strahlverlauf am Detektor (siehe Abb. 4.4) kann die Fokusslage relativ zur Datenschicht ermittelt werden.

Der Detektor ist dabei so positioniert, dass bei optimaler Fokussierung auf die Datenschicht ein runder Spot auf die vier Detektorflächen trifft. Das Differenzsignal der Einzeldetektoren  $(A+D)-(B+C)$  wird hierbei Null. Ist die Datenschicht der Disk nicht in der Fokusebene, kommt es zu einem divergenten bzw. konvergenten Rückstrahlbündel und einer Verschiebung des Strahlverlaufs am Detektor. Je nach Richtung und Betrag der Fokusverschiebung trifft durch den astigmatischen Strahlverlauf eine senkrechte bzw. waagerechte Fokusellipse auf den Detektor, was zu einem positiven bzw. negativen Differenzsignal führt. Fährt man die Objektivlinse kontinuierlich entlang der optischen Achse an die Disk heran (bzw. von ihr weg), so entsteht als Spannungssignal eine S-Kurve. Diese dient als Regelsignal



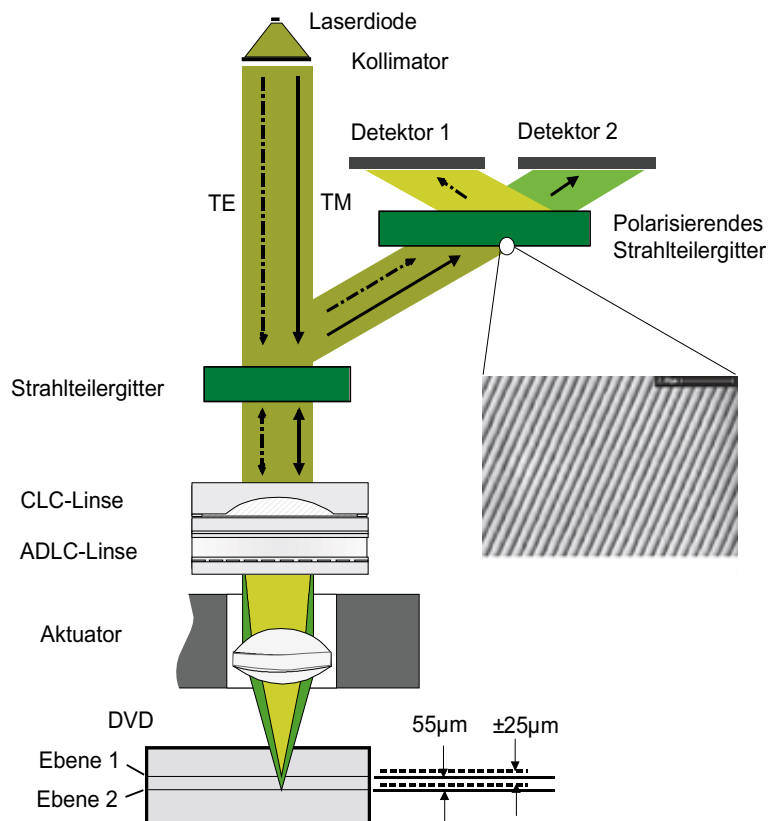
**Abb. 4.4:** Astigmatischer Strahlverlauf und Quadrantendetektor

für die Linsennachführung und wird in Abschn. 4.5 zur Demonstration der Funktion des Optikmoduls verwendet.

## 4.2 Neuer optischer Abtastkopf mit axialem Doppelfokus

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines neuartigen optischen Abtasters, der in der Lage ist, beide Datenebenen einer DVD gleichzeitig auszulesen. Die verwendeten Komponenten sollten hierbei hoch funktionell, gleichzeitig aber auch kostengünstig und einfach zu justieren sein. Es wurde ein Konzept entwickelt, das mit Hilfe diffraktiver und adaptiver Optiken und einem planaren Aufbau diese Anforderungen erfüllt. Eine zentrale Aufgabe stellte hierbei die Entwicklung einer variablen Doppel-Fokus Optik dar, die im Laufe des Projektes mit der Entwicklung von FK-Linsen (CLC- und ADLC-Linse) gelöst werden konnte. Das Erzeugen eines Doppel-Fokus und somit das gleichzeitige Fokussieren auf beide Datenschichten funktioniert, da FK-Linsen zwei polarisationsabhängige Brennweiten besitzen. Durch Anlegen einer Spannung lässt sich die Brennweite der Linse für eine Polarisationsrichtung verändern, was die Möglichkeit eröffnet, auftretende Dickenschwankungen der Zwischenschicht zu kompensieren. Der Abstand zweier Datenschichten einer DVD beträgt ca.  $55\ \mu\text{m}$  mit einer zu Projektbeginn angegebenen Herstellungstoleranz von  $\pm 15\ \mu\text{m}$ . Für eine sichere Funktion wurden die FK-Linsen für eine Fehlerkorrektur von  $\pm 25\ \mu\text{m}$  ausgelegt. Die Linsen wurden für eine Wellenlänge von  $650\ \text{nm}$  optimiert, können aber im gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich eingesetzt werden. Aufgrund der vorgegebenen Anforderungen wurden zwei Systemdesigns erarbeitet, die einerseits die Verwendung einer einzigen CLC-Linse, andererseits zum Erreichen kürzerer Schaltzeiten die Verwendung einer CLC-Linse in Kombination mit einer ADLC-Linse vorsehen. Für die Fokus- und Spurlagennachführung der ersten Datenschicht wurde ein Aktuator aus einem kommerziel-

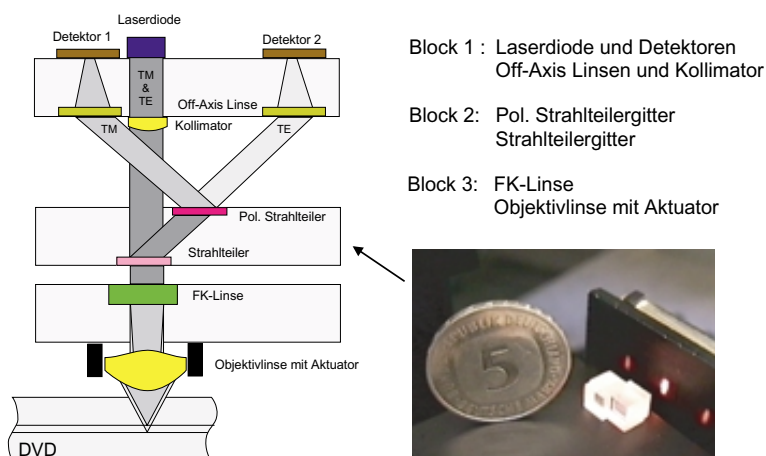
len DVD-Abtastkopf verwendet. Im ersten Fall wurde eine einzelne, schaltbare CLC-Linse eingesetzt, um den Fokus von der hinteren Datenschicht um  $+25\text{ }\mu\text{m}$  über die erste Datenschicht hinaus zu verschieben. Die Brennweite der DVD-Objektivlinse betrug  $F=3.37\text{ mm}$ . Es wurden CLC-Linsen mit einer dynamischen Brennweiten von  $F=200\text{ mm}$  bis unendlich bei Linsendurchmessern von  $d=5\text{ mm}$  untersucht. CLC-Linsen, die die benötigten Brennweitenänderungen erreichen, besitzen relativ große Zelldicken und zeigen dadurch ein langsames Schaltverhalten von bis zu einigen Sekunden. Um Schaltzeiten von einigen  $10\text{ ms}$  zu erreichen, die für die gewünschte Fokussachführung notwendig sind, wurde ein zweiter FK-Linsentyp, die so genannte ADLC-Linse, entwickelt. Das neue Konzept, das in Abb. 4.5 dargestellt ist, ersetzt die dynamische CLC-Linse durch eine statische CLC-Linse in Kombination mit einer ADLC-Linse. Die statische CLC-Linse erzeugt nun im Zusammenspiel mit der DVD-Objektivlinse zwei Foki im Abstand von  $55\text{ }\mu\text{m}$ , während die ADLC-Linse nur noch entstehende Abweichungen von  $\pm 25\text{ }\mu\text{m}$  korrigiert. Eine ADLC-Linse alleine wäre aufgrund der hohen Beugungsverluste (siehe Abschn. 4.4.3) bei großen Brennweitenänderungen (hier  $75\text{ }\mu\text{m}$ ) nicht sinnvoll einsetzbar gewesen.



**Abb. 4.5:** Schematischer Aufbau des entwickelten Pickup-Systems

Abb. 4.5 zeigt den schematischen Aufbau des entwickelten Systems. Das Licht einer roten Laserdiode ( $\lambda=650\text{ nm}$ ) wird durch einen Kollimator parallelisiert und durch ein Strahlteilergitter hindurch mit einer Objektivlinse auf die Datenschicht fokussiert. Auf dem Rückweg werden 10 % des zurückkommenden Lichtes am Strahlteilergitter ausgekoppelt und mit Hilfe eines polarisierenden Strahlteilergitters in seine Polarisationsrichtungen aufgespalten. Über zwei Off-Axis Linsen wird das Licht auf die Detektoren abgelenkt und das Datensignal sowie die Fokus- und Trackingsignale analysiert.

Die sensiblen Justagetoleranzen heutiger Systeme machen eine Justage der Einzelkomponenten im Lesekopf notwendig. Die dadurch entstehenden langen Laufzeiten in der Produktion stellen einen nicht unerheblichen Kostenfaktor dar. Der große Vorteil des neuen Laufwerkskonzeptes steckt im modularen Aufbau des Systems, was die Justage wesentlich vereinfacht. Abb. 4.6 zeigt das geplante Schreib-/Lesemodul inklusive aller optischen und elektrischen Komponenten. Im ersten Modul werden alle elektrischen Komponenten (Detektoren, Laserdiode) sowie deren Kollimationsoptiken integriert. Das zweite Modul dient der Strahlführung und besteht aus den in 4.5 dargestellten DOE's, die beim Fertigungsprozess auf der Vorder- und Rückseite belichtet werden. Der neben der Skizze dargestellte Glasblock zeigt einen Prototypen von Modul 2, bei dem die Gitter der Einfachheit halber auf das Trägersubstrat geklebt wurden.



**Abb. 4.6:** Modularer Aufbau des neuen optischen Abtasters

Durch großzügige Auslegung der DOE-Flächen können so Zentrierungsfehler umgangen, durch die planare Bauweise auftretende Verkipnungen zwischen Bauelementen eingeschränkt werden. Zum Design der hergestellten Ablenkgritter waren Toleranzrechnungen notwendig. Diese wurden von D. Dias [42] im Rahmen seiner Promotion durchgeführt. Für die herstellungsrelevanten Aspekte von DOE's sei auf die Arbeiten von S. Stankovic [33] verwiesen. Es wurden mehrere Ablenkgritter sowie polarisierende Sub-Wellenlängen-Gitter berechnet und am Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin e.V. hergestellt. Phasenverzögerungsplatten, Strahlteiler und polarisierende Strahlteiler mit einer Gitterperiode

bis hinunter zu 140 nm und Aspect-Verhältnissen (Tiefe zu Stegbreite) von bis zu 7 konnten in guter Qualität realisiert werden. Die Abweichungen der Gitterperiode und -tiefe von den Designvorgaben lagen bei 1-2 % und damit innerhalb der vorgegebenen Toleranzen. Die erwartete hohe Effizienz und Funktion der DOEs sowie die gute Wellenfront der FK-Linsen wurden durch Messungen bestätigt, ebenso die dynamische Fokuskontrolle der FK-Linsen, auf die in Abschn. 4.5 eingegangen wird.



## 4.3 Die konvexe Flüssigkristalllinse (CLC-Linse)

### 4.3.1 Einleitung

In den letzten 20 Jahren wurden eine Reihe schaltbarer Linsen mit variabler Brennweite für mikrooptische Systeme entwickelt, so beispielsweise Linsen, die durch Änderung der Linsenform (z.B. durch Verformen eines Flüssigkeitstropfens durch ein elektrisches Feld [43]) oder durch Verschieben von Linsen gegeneinander die Brennweite variieren. Wie in Abschn. 4 dargestellt, wird bei dem hier vorgeschlagenen Konzept eine Linse benötigt, die zum einen das Licht abhängig vom Polarisationszustand fokussiert, zum anderen in der Lage ist, den Abstand ihrer Foki an Dickenschwankungen der Disk anzupassen. Zum Erzeugen von Linsen mit polarisationsabhängigen und gleichzeitig variablen Brennweiten können Materialien mit steuerbarer Doppelbrechung eingesetzt werden. Aufgrund der benötigten großen Fokuseparation von  $75\text{ }\mu\text{m}$  nach der Objektivlinse und des damit verbundenen großen Phasenhubs ( $\sim \Delta n \cdot d$ ) scheiden jedoch alle elektro- und akustooptischen Materialien ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , etc.) aus. Die einzigen Materialien, die eine entsprechend große Brechungsindexmodulation ( $\Delta n \approx 0.2 - 0.4$ ) besitzen und somit einen großen Phasenhub realisieren können, sind Flüssigkristalle. In der Literatur gibt es zwei Typen von FK-Linsen. Planare FK-Linsen, die durch geschickte Wahl von Elektroden eine sphärische Feldverteilung im FK-Medium erzeugen (Modal Control Linsen [44] [45], Mikrolinsen [46] [47], Linsen mit Elektrodenringen [48] [49]) und solche, die den Brechungsindex in einem linsenförmigen Glaskörper modulieren (Linsen [50], Mikrolinsen [51], Fresnellinsen [52] [53]). Obwohl diese FK-Linsentypen bereits in der Literatur bekannt sind, wurden diese bisher nicht in kommerziellen Anwendungen eingesetzt. Um FK-Linsen in optischen Laufwerken einsetzen zu können, mussten verschiedene physikalische Probleme zur Optimierung der Wellenfrontqualität, der Transmission und der Schaltzeiten gelöst werden. Neben den gesamten fertigungsrelevanten Aspekten wurden Simulationen zu den Elementen durchgeführt sowie mehrere Messaufbauten zur Charakterisierung und Vermessung der Linsen sowie des Gesamtsystems umgesetzt.

### 4.3.2 Aufbau einer CLC-Linse

Die in Abb. 4.7 dargestellte CLC-Linse kann als herkömmliche Linse mit variablem Brechungsindex angesehen werden.

Die Zelle wird aus einer Glasplatte und einer plan-konkaven Linse hergestellt, wobei innenliegende Flächen mit transparenten Elektroden (Indium-Zinn-Oxid) und einer Orientierungsschicht aus Polyimid beschichtet sind. Beide Glasteile werden unter Verwendung von Abstandshaltern (Kugelspacer, Mylarfolie) gegeneinander justiert, mit UV-härtendem Kleber punktwise fixiert und die Zelle unter Vakuum mit Flüssigkristallen befüllt. Zum endgültigen Verschließen der Zelle wird diese mit einem schnell aushärtenden Zweikomponenten Epoxy-Harz Kleber (UHU-Endfest 300) versiegelt.

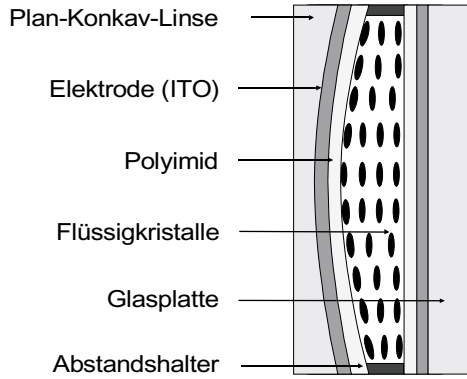


Abb. 4.7: Aufbau einer CLC-Linse

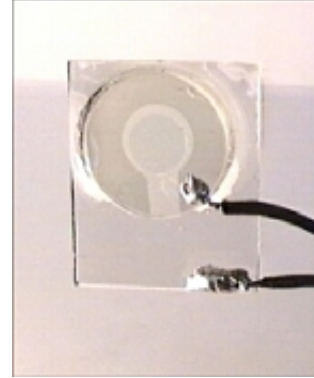


Abb. 4.8: Bild einer CLC-Linse

Die CLC-Linse kann in zwei Konstellationen eingesetzt werden:

- Als statische Linse mit zwei festen Brennweiten. In diesem Fall wird keine Spannung an die Elektroden angelegt. Das einfallende Licht wird in TE- und TM-Polarisation aufgespalten und aufgrund der Doppelbrechung des Materials auf verschiedene Brennebenen fokussiert. Liegt der FK-Direktor parallel zur TE-Polarisationsachse, so ergeben sich folgende Brennweiten:

$$F_1 = \frac{R}{n_e - n_g} \quad \text{für TE-Polarisation} \quad (4.1)$$

$$F_2 = \frac{R}{n_o - n_g} \quad \text{für TM-Polarisation,} \quad (4.2)$$

wobei  $R$  den Radius der verwendeten Plan-Konkav-Linse,  $n_g$  den Brechungsindex des Linsenkörpers und  $n_e$  und  $n_o$  den außerordentlichen und ordentlichen Brechungsindex des verwendeten Flüssigkristalls darstellen.

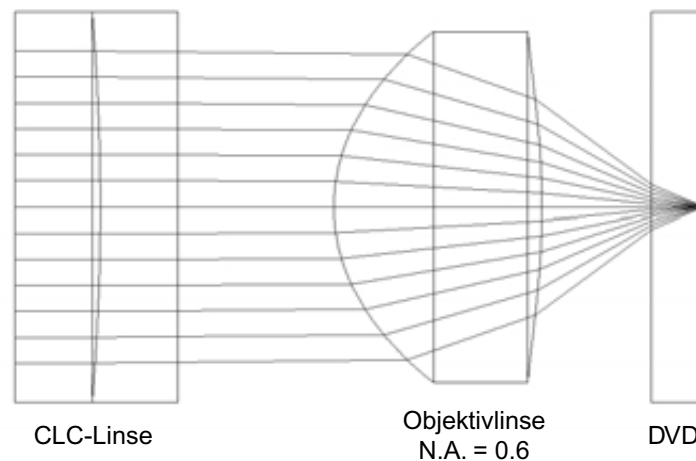
- Als dynamische Linse mit einer festen und einer variablen Brennweite. Durch Anlegen einer Wechselspannung drehen sich die FK-Moleküle ins elektrische Feld und ändern in Abhängigkeit der lokalen Feldstärke ihren effektiven Brechungsindex  $n_{eff}(U)$  für TE-polarisiertes Licht. Durch eine Spannungsvariation lassen sich so beliebige Brennweiten zwischen  $F_1$  und  $F_2$  einstellen. Die Brennweite für TM-polarisiertes Licht bleibt hingegen konstant. Die Brennweite  $F_1$  ändert sich hierbei zu

$$F_1 = \frac{R}{n_{eff}(U) - n_g} \quad \text{für TE-Polarisation} \quad (4.3)$$

### 4.3.3 Simulationen

Die entwickelten CLC-Linsen wurden speziell für den Einsatz in einem optischen DVD-Lesekopf konzipiert. Die in einem solchen System verbauten Elemente, vor allem die asphärische

Objektivlinse hoher N.A., machte es notwendig, die Funktion der CLC-Linsen im Gesamtsystem zu simulieren. Hierfür kam die Raytracing-Software *Zemax* zum Einsatz. So konnten verschiedene Eigenschaften der CLC-Linse wie die Verschiebetoleranzen gegenüber der Objektivlinse, die benötigte Brechungsindexvariation des Flüssigkristalls zum Korrigieren der Fokusslage sowie der notwendige Linsenradius zum Bau der benötigten Konkavlinse ermittelt werden.



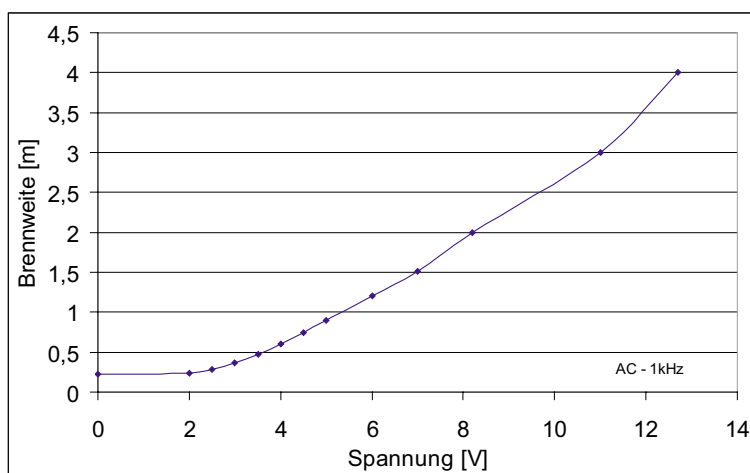
**Abb. 4.9:** Simulation der CLC-Linse mittels ZEMAX

Abb. 4.9 zeigt den für die Simulationen entscheidenden Teil des optischen Laufwerkes (CLC-Linse, Objektivlinse, Disk mit Fokus auf der Datenschicht). Der Glaskörper der CLC-Linse besteht aus BK7-Glas, der FK wird durch ein Medium mit variablem Brechungsindex modelliert, wobei die Daten aus den Dispersionsmessungen (Abschn. 2.3.3) mittels der Cauchy-Formel auf 633 nm extrapoliert wurden. Die Simulationen zeigten, dass durch den Einsatz einer CLC-Linse mit den Brennweiten  $F=200$  mm für TE- und  $F=\infty$  für TM-Polarisation die gewünschte Brennweitenverschiebung von  $55 \pm 25 \mu\text{m}$  erzeugt werden kann.

#### 4.3.4 Messungen

##### Spannungsabhängigkeit der Brennweite

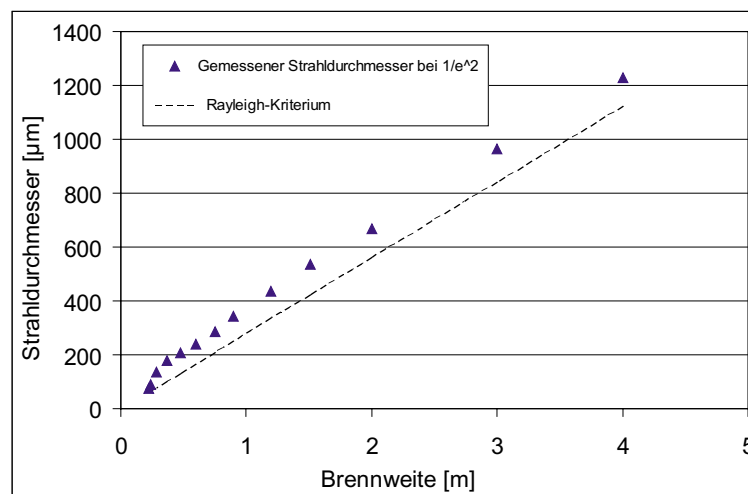
Durch Anlegen einer Wechselspannung lässt sich die Brennweite einer CLC-Linse für TE-polarisiertes Licht dynamisch variieren. Abb. 4.10 zeigt die gemessene Brennweitenverschiebung in Abhängigkeit der angelegten Spannung. Zur Bestimmung der Linsenbrennweite kam ein Knife-Edge-Sensor (WM100B) der Fa. Thorlabs zum Einsatz. Mit diesem wurde der kleinste Strahldurchmesser entlang der optischen Achse gesucht und der Abstand des Sensors zur FK-Linse aufgezeichnet.



**Abb. 4.10:** Veränderung der Brennweite über die angelegte Spannung

Wie in Abb. 4.10 zu sehen ist, beginnt die Brennweitenänderung erst ab einer Schwellenspannung  $U_{Schwelle}$  von ca.  $2 V_{PP}$ . Beim Überschreiten der Schwellenspannung treten starke Lageänderungen der FK-Moleküle an den Rändern der Linse auf, die sich bis ins Zentrum der Linse fortpflanzen. Es kommt zu einem kurzzeitigen Defokussieren (starke sphärische Aberrationen) des optischen Strahlenbündels. Nach diesem Einschalteffekt, der nur beim Überschreiten der Schwelle auftritt, ist ein kontinuierliches Verschieben der Brennweite möglich. Zur Bestimmung der Aberrationen während des Betriebs wurden die Spotgrößen für die Brennweiten von  $F = 35$  cm (Minimalbrennweite) bis  $F = 400$  cm vermessen, die im Vergleich mit einem idealen Spot einer beugungsbegrenzten Linse (Rayleigh-Kriterium) ein Maß für vorhandene Aberrationen darstellen. Die mit Hilfe der Knife-Edge-Methode gemessenen Spotdurchmesser ( $1/e^2$ ) sind in Abb. 4.11 dargestellt.

Die gestrichelte Linie gibt die durch das Rayleigh-Kriterium ( $d = k \cdot \lambda / N.A.$ , hier  $k=1$ ) definierte Beugungsgrenze an. Für die CLC-Linse wurde ein nahezu beugungsbegrenzter Fokus über den ganzen Brennweitenbereich gemessen. Dies erscheint zunächst überraschend, da der Brechungsindex von der lokalen Feldstärke abhängt, die bei der CLC-Linse radial nach außen zunimmt. Bei der vorliegenden gekrümmten Zellgeometrie erwartet man daher sphärische Aberrationen und somit einen vergrößerten Spotdurchmesser. Eine Erklärung dafür, dass dies nicht eintritt, liefern die molekularen Rückstellkräfte, die, ebenso wie die Feldstärke, zum Rand hin zunehmen und bei nicht zu großen Dickenänderungen der Zelle (verursacht durch die Linsenkrümmung) für eine homogene Brechungsindexverteilung sorgen.



**Abb. 4.11:** Spotdurchmesser einer CLC-Linse bei verschiedenen Brennweiten

### Schaltzeiten/Schaltverhalten

Wie in Abschn. 2.3.5 gezeigt wurde, besitzen nematische FK-Zellen ein unterschiedliches Ein- und Ausschaltverhalten. Das Schaltverhalten von Flüssigkristallen lässt sich auf das Schaltverhalten der Zelle übertragen. Zur Messung der Linsen-Schaltzeiten wurde ein Fotodetektor mit einer Blende von 1 mm Durchmesser in die Brennebene  $F_1$  gestellt und die durch eine Fokusverschiebung entstandene Intensitätsvariation aufgezeichnet. Jedes der eingezeichneten Niveaus (1, 2, 3) repräsentiert eine Fokusposition. Das Verhalten beim Schalten von Brennweite  $F_1 = 260$  cm zur Brennweite  $F_2 = 230$  cm und von  $F_1$  nach  $F_3 = 40$  cm ist in Abb. 4.12 dargestellt, die Schaltzeiten sind Tab. 4.1 zu entnehmen.

Fokusverschiebung von	Schaltzeit [s]
$F_1 \rightarrow F_2$	0.45
$F_2 \rightarrow F_1$	0.41
$F_1 \rightarrow F_3$	2.85
$F_3 \rightarrow F_1$	0.8

**Tab. 4.1:** Schaltzeiten einer CLC-Linse

Ersichtlich ist eine starke Abhängigkeit der Schaltzeit von der angesteuerten Brennweite. Beim Schalten in hohen Spannungsbereichen (5-20 V) sind die Rückstellkräfte zwischen den Molekülen stark und die Brennweitenvariationen schnell (Abb. 4.12, links). Schaltet man über den vollen Spannungsbereich (0-20 V), so entstehen durch Reorientierungsprozesse starke Fluktuationen, welche das Schaltverhalten negativ beeinflussen (Abb. 4.12, rechts). Es ist daher empfehlenswert, dicke CLC-Linsen im oberen Spannungsbereich zu betreiben bzw. Materialien mit höherer Doppelbrechung zur Reduktion der Zelldicke einzusetzen

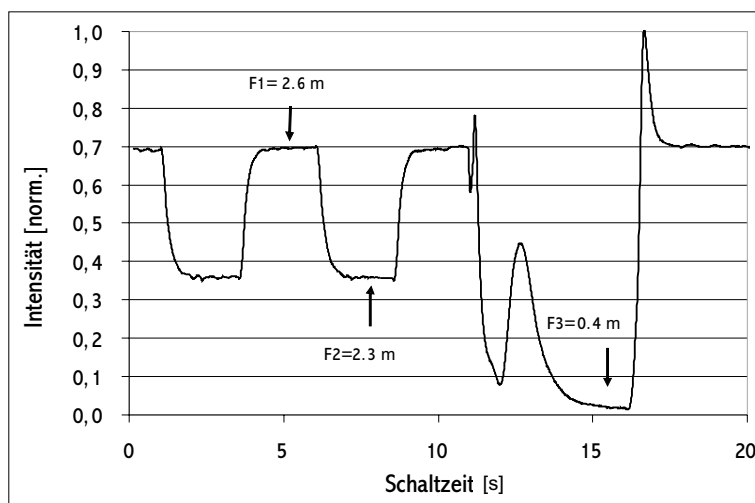


Abb. 4.12: Schaltverhalten einer CLC-Linse

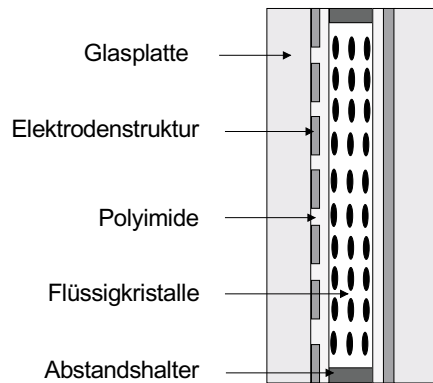
(siehe Abschn. 5.4).

## 4.4 Die adaptive Flüssigkristalllinse (ADLC-Linse)

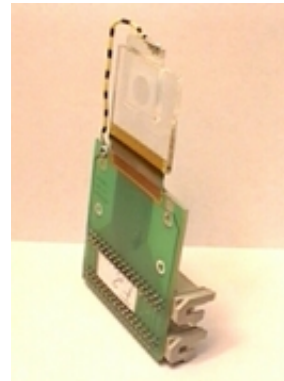
Wie in Abb. 4.12 zu sehen, besitzen CLC-Linsen Schaltzeiten im Bereich einiger Sekunden und sind somit für eine aktive Korrektur der Fokusabstände ungeeignet. Die ersten auf den Markt gekommenen optischen DVD-Laufwerke benötigten Nachführgeschwindigkeiten im Bereich einiger 10 ms. Um die Anforderungen an die kurzen Schaltzeiten zu erfüllen, wurde ein neuer Linsentyp, die sog. *Adaptive-Liquid-Crystal Lens* (ADLC-Linse) entwickelt. Durch den Einsatz gebrazter und binärer diffraktiver Phasenprofile (Fresnelzonenlinse) konnte die Zelldicke und somit die Schaltzeit deutlich reduziert werden. Unter zusätzlicher Verwendung des in Abschn. 2.3.6 vorgestellten Transient-Nematic-Effekts sowie durch den Einsatz ferroelektrischer FKe (siehe Abschn. 2.4) konnten somit Schaltzeiten von 10 ms und 0.3 ms erreicht werden.

### 4.4.1 Aufbau

Die ADLC-Linse besitzt, anders als die CLC-Linse, eine planare Zellgeometrie (Abb. 4.13). Auf den Innenseiten der Glasplatten befinden sich Elektroden aus Indium-Zinn-Oxid (ITO). Eine der Elektroden besitzt eine Struktur aus 64 konzentrischen Ringen sowie Zuleitungen, die gegenüberliegende Elektrode ist unstrukturiert. Nach Aufbringen der Orientierungsschicht aus Polyimid wurde die Zelle, wie in Abschn. 3.2 beschrieben, im Vakuum mit FKen befüllt. Zum Kontaktieren der 64 Zuleitungen wurde ein aus der Halbleitertechnologie bekanntes Verfahren (Thermo-Kompressiv-Bonden) eingesetzt, das mit Hilfe

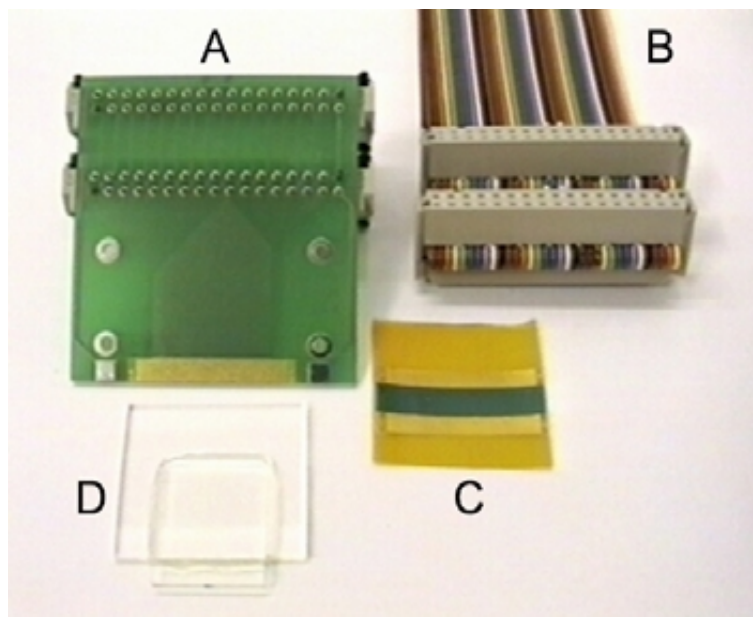


**Abb. 4.13:** Schematische Darstellung einer ADLC-Linse



**Abb. 4.14:** Bild einer ADLC-Linse

eines leitfähigen anisotropen Films (ACF-Band) die auf dem Glas (D) angebrachten ITO-Elektroden mit Gold-Elektroden einer Kontaktierungsplatine (A) über ein Flexband (C) verbindet (siehe Abb. 4.15). ACF-Band ist ein mit leitfähigen Kugeln durchsetztes Klebeband, das durch Temperatur und Druck zwischen Glas und Flexband schmilzt und eine Verbindung der Elektroden ohne laterale Kontakte ausbildet.



**Abb. 4.15:** Komponenten einer ADLC-Linse

Um die Linse anzusteuern, wurden zwei speziell für diesen Zweck entwickelte Ansteuerkarten eingesetzt. Jede Karte verfügt über 32 Kanäle und erlaubt die Erzeugung einer beliebigen Signalform mit Amplituden von bis zu  $\pm 40$  V mit einer Auflösung von je 8 Bit bei Refreshraten von 1 kHz. Um auch bei kleineren Spannungen (5-10 V) den vollen

Dynamikbereich nutzen zu können, wurden zusätzliche Adapterkarten angefertigt, die als Spannungsteiler fungieren.

Eine ADLC-Linse arbeitet wie eine schaltbare diffraktive Fresnellinse. Das Phasenprofil der Fresnellinse wird hierbei in der FK-Schicht durch geeignete Ansteuerung der Elektroden erzeugt. Das zu erzeugende Phasenprofil für eine Brennweite  $F$  ist gegeben durch

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ F - \left( F^2 + \left( x - \frac{d}{2} \right)^2 + \left( y - \frac{d}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]_{\text{mod} \lambda} \quad (4.4)$$

Durch Zuordnung des Phasenhubs zu den Elektrodenringen können mittels der vorher gemessenen PSC die notwendigen Ansteuerspannungen an den Ringelektroden ermittelt werden. Durch Neuberechnung des Spannungsprofils für benachbarte Brennweiten wird so eine quasi-kontinuierliche Verschiebung des Fokuspunktes erreicht. Zum Erzielen möglichst kurzer Schaltzeiten wurde der obere Spannungsbereich (5-40 V) der PSC gewählt.

#### 4.4.2 Elektrodesign

Ziel des Elektrodesigns war die Erzeugung sphärischer Phasenprofile. Hierbei war eine zusätzliche Option, beliebige sphärische Aberrationen, welche durch schlecht justierte Linsen im System entstehen, mit Hilfe des eingebauten FK-Elementes zu beseitigen. Hierzu wurde ein Elektrodenlayout entwickelt, das es erlaubte, neben der Erzeugung eines fresnellinsenförmigen Phasenverlaufs auch komplexere rotationssymmetrische Phasenverläufe zu erzeugen. Um dies zu realisieren, wurde eine Elektrodenstruktur aus 64 äquidistanten Ringen entworfen. Die aktive Zone der Struktur hat einen Durchmesser von 5 mm mit Ringbreiten von 50  $\mu\text{m}$  und Ringabständen von 10  $\mu\text{m}$ . Die Breiten und Abstände der Ringe wurden auf maximale Fokuseffizienz und geringes Übersprechen bei Spannungen bis zu 40  $V_{PP}$  ausgelegt, wozu auf Simulationsergebnisse von Eschler [54] zurückgegriffen wurde. Die Elektrodenstruktur wurde bei der Fa. Jenoptik mittels Elektronenstrahl- und Photolithographie hergestellt und ist in Abb. 4.16 zu sehen.

#### 4.4.3 Simulationen

Bei den durchgeführten Simulationen waren die Fokuseffizienz und das entstehende Beugungsbild von besonderem Interesse:

##### Fokuseffizienz

Da es sich bei der vorliegenden Linse um eine diffraktive Linse handelt, wird das Licht durch Beugung am fresnellförmigen Phasenprofil fokussiert. Durch die nicht ideale Approximation des Fresnelprofils wird Licht in höhere Ordnungen gebeugt, das sich aufgrund



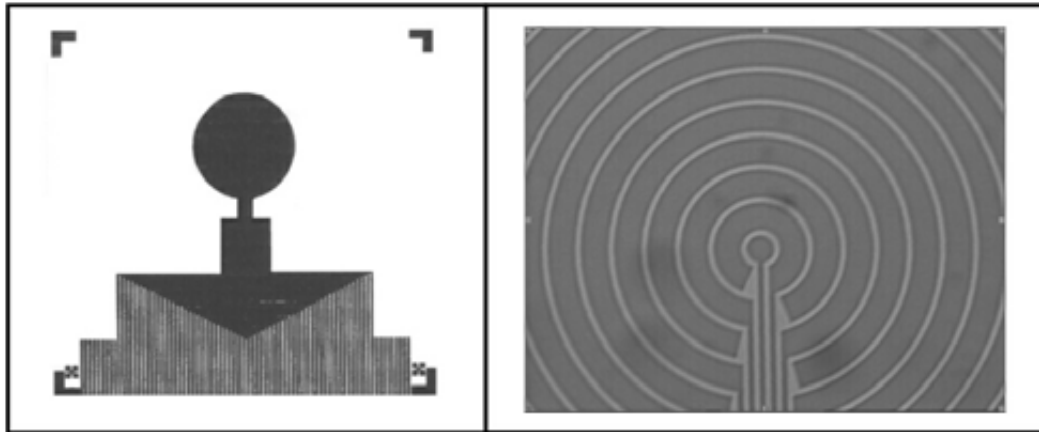
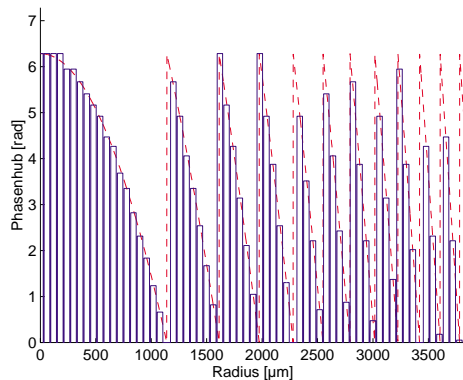
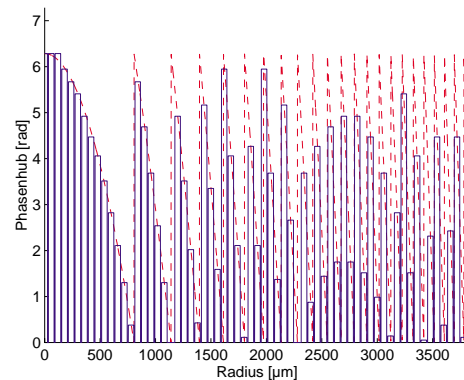


Abb. 4.16: Elektrodenstruktur

des rotationssymmetrischen Phasenprofils durch Beugungsringe um den Fokus äußert. Die Fokuseffizienz wird als der Anteil des Lichtes verstanden, das in der Brennebene der FK-Linse um einen Bereich der Größe einer Airyscheibe mit dem Durchmesser  $1.22 \cdot \lambda / N.A.$  um das Zentrum der optischen Achse einfällt und somit dem Beugungswirkungsgrad der 1sten Ordnung entspricht.

Bei ADLC-Linsen hängt die Fokuseffizienz von der gewählten Brennweite ab. Aufgrund der diskreten Elektrodenstruktur können nur Fresnelprofile ausreichend gut angenähert werden, deren äußere Fresnelzonen groß gegenüber der verwendeten Elektrodenbreite sind. Die Abbildungen 4.17 und 4.18 zeigen die sich aus den Simulationen ergebenden Fresnel-linsenprofile für eine Brennweite von  $F_1=100$  cm und  $F_2=50$  cm.

Abb. 4.17: Angenähertes Phasenprofil bei  $F_1=100$  cmAbb. 4.18: Angenähertes Phasenprofil bei  $F_2 = 30$  cm

Die gestrichelte Linie zeigt den idealen Brechungsindexverlauf, die durchgezogene Linie den erzeugten Phasenhub über den Elektrodenringen. Das Angleichen der äußeren Zonen durch die diskreten Phasenplateaus an die Ideallinie gelingt bei  $F_1$  relativ gut. Für Brennweiten

deutlich unter 100 cm können nur noch innere Zonen ausreichend angenähert werden, was in den äußeren Zonen zu ungewünschter Beugung des Lichtes in höhere Ordnungen führt.

Zur Berechnung der Fokuseffizienz wurde, ausgehend von jedem Punkt des durch die Elektroden erzeugten Phasenprofils, die optische Weglänge zum Brennpunkt und dessen Beitrag zur Fokusintensität bestimmt. Die berechneten Effizienzen sind zusammen mit den aus den Messungen erhaltenen Werten in Abb. 4.24 dargestellt.

## Beugungsbild

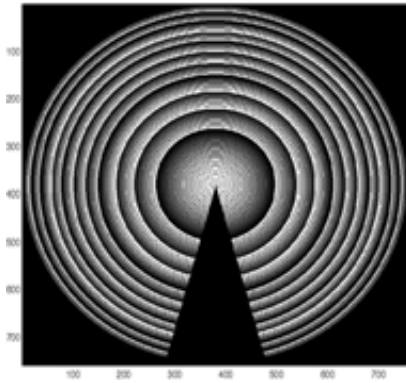
Um die Intensitätsverteilung hinter einer FK-Linse zu simulieren, kamen im Wesentlichen zwei Berechnungsmethoden zum Einsatz:

- die Angular-Spektrum-Methode
- die Fraunhofer-Näherung

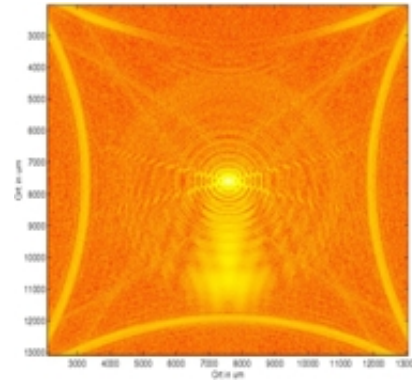
Die Angular-Spektrum-Methode (ASM) [55] erlaubt bei bekannter Phasen- ( $\phi(x, y)$ ) und Intensitätsverteilung  $I(x, y)$  in der Objektebene, die Intensitätsverteilung  $I'(x, y)$  in einer im Abstand  $z$  senkrecht zur optischen Achse liegenden Ebene durch Propagation ebener Wellen zu berechnen. Die Methode zeichnet sich gegenüber der aufwändigen Integration nach Fresnel-Kirchhoff dadurch aus, dass die Berechnung mittels zweier Fouriertransformationen durchgeführt werden kann. Da hier sehr schnelle Algorithmen vorliegen, kann die Rechenzeit auch bei großen Matrizen (500x500 bis 4000x4000) in vernünftiger Zeit (einige Stunden) gelöst werden, was mittels des Fresnel-Kirchhoff-Integrals mehrere Tage in Anspruch nimmt. Lag die Bildebene in der Brennebene der FK-Linse, so wurde die Intensitätsverteilung mittels des Fraunhofer Integrals ermittelt, dessen Berechnung schnell durchführbar ist, da hierfür nur eine anstatt zwei Fouriertransformationen notwendig sind. Zur Ermittlung der in der Objektebene durch die FK-Linse erzeugten Phasen- und Intensitätsverteilung wurde die FK-Linse unter *Matlab* simuliert. Hierzu wurde das Phasenprofil einer Fresnellinse mit gewünschter Brennweite  $F$  durch die vorgegebenen Elektrodenflächen quantisiert (über diesen geglättet) und durch Umsetzung des Profils in eine Matrix die so erhaltene zweidimensionale Phasenmatrix mittels obiger Methode zur Berechnung herangezogen. Abb. 4.19 zeigt die so gewonnene Phasenmatrix der FK-Linse bei einer Brennweite von  $F=100$  cm. Die mittels der Angular-Spektrum-Methode ermittelte Intensität in der Brennebene ist in Abb. 4.20 dargestellt.

Abb. 4.21 und 4.22 zeigen die durch Lösen des Fresnelintegrals ermittelte logarithmisch aufgetragene Intensitätsverteilung in der Brennebene sowie deren Y-Querschnitt.

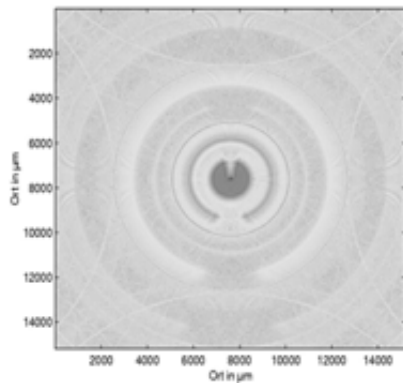
Zu erkennen ist der zentrale Fokusspot sowie weitere Ringe, die aufgrund des treppenartigen Phasenverlaufs und der damit einhergehenden Beugung in höheren Ordnungen entstehen.



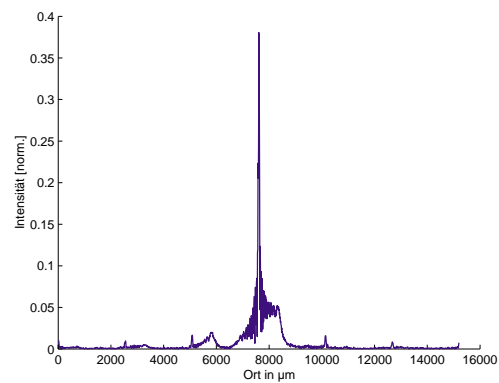
**Abb. 4.19:** 2-dim. Phasenprofil der ADLC-Linse für  $F=100$  cm



**Abb. 4.20:** Intensitätsverteilung bei  $Z=100$  cm, berechnet mittels ASM



**Abb. 4.21:** Intensitätsverteilung bei  $z=100$  cm, berechnet mittels Fraunhoferintegral



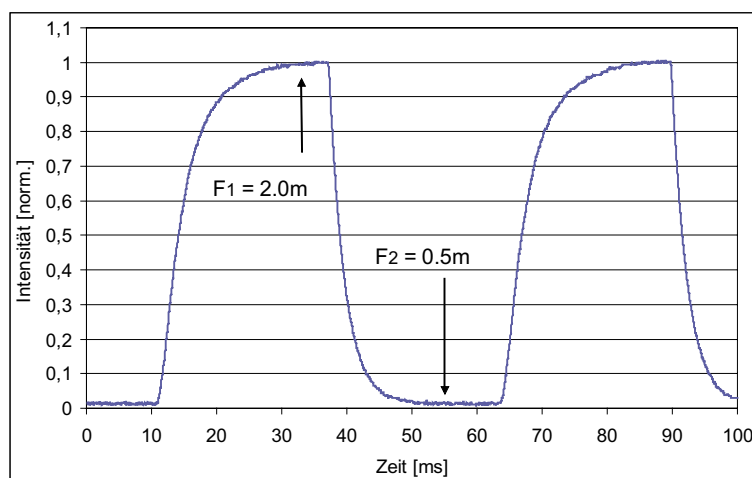
**Abb. 4.22:** Y-Querschnitt durch das Zentrum

#### 4.4.4 Messungen

##### Schaltzeiten

Zur Messung der Schaltzeiten wurde die ADLC-Linse auf eine  $z=F_1=200$  cm entfernte Lochblende mit 1 mm Durchmesser fokussiert und die Intensität hinter der Blende mit einem Photodetektor aufgezeichnet. Durch Verschieben der Brennweite (Erzeugen eines Fresnelprofils mit Brennweite  $F_2$ ) nimmt die Intensität am Photodetektor ab. Ein so gemessener Intensitätsverlauf einer geblazten ADLC-Linse beim Schalten von  $F_1$  auf  $F_2=50$  cm ist in Abb. 4.23 dargestellt.

Die ermittelte Schaltzeit ist die Zeit, die zum Erreichen von 90 % des neuen Intensitätsplateaus benötigt wird. Zum Erreichen kurzer Schaltzeiten wurden alle nematischen ADLC-Linsen im hohen Spannungsbereich (5-40 V) betrieben. Es wurden sowohl geblazte (siehe Abb. 4.17,  $\phi_{max} = 1\lambda$ ) wie auch binäre Fresnellinsenprofile ( $\phi = 0, \lambda/2$ ) realisiert. Für geblazte



**Abb. 4.23:** Schaltverhalten einer geblazten ADLC-Linse beim Schalten von  $F_1=200$  cm nach  $F_2=50$  cm

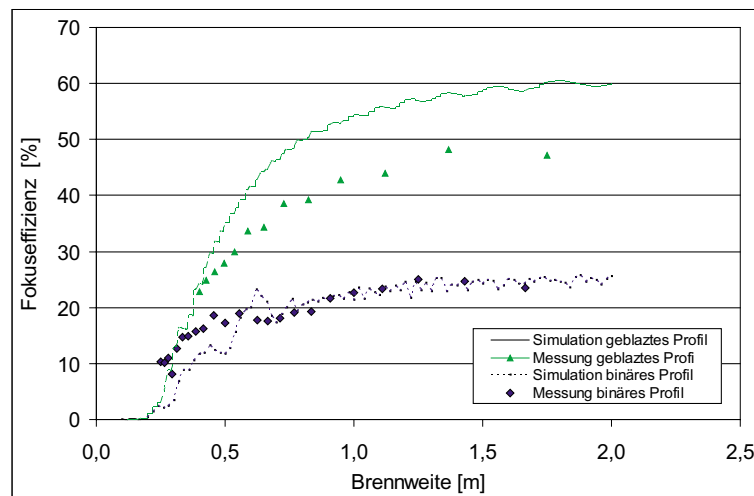
Fresnelprofile konnten mit nematischen FKEN Schaltzeiten von 50 ms, für binäre Fresnelprofile Schaltzeiten von 10 ms erreicht werden. Neben nematischen ADLC-Linsen wurden auch ADLC-Linsen mit ferroelektrischen FKEN realisiert. Diese erreichten hierbei Schaltzeiten von 0.3 ms. Gegenüber CLC-Linsen weisen ADLC-Linsen ein symmetrisches Ein- und Ausschaltverhalten auf (siehe Abb. 4.23). Überdies ist beim Schalten zwischen unterschiedlichen Brennweiten keine Änderung der Schaltzeit zu erkennen. Die Konstanz der Schaltzeit erklärt sich dadurch, dass jeder einzelne Ring unterschiedlich lange zum Schalten braucht, er aber nur  $1/64$  zur Gesamtintensität beiträgt. Die Schaltzeit der ADLC-Linse ergibt sich somit aus der gemittelten Schaltzeit über alle Ringe.

### Fokuseffizienz und Spotdurchmesser

ADLC-Linsen zeigen aufgrund ihres diskreten Phasenprofils ein ringförmiges Beugungsbild (siehe Abb. 4.21). Zur Bestimmung der Fokuseffizienz ist jedoch nur die Intensität im Zentrum interessant, die mit Hilfe einer Blende von der Größe einer Airydisk in der Brennebene gemessen wurde. Die Fokuseffizienz stellt hierbei das Verhältnis der gemessenen Intensität hinter der Blende zur Gesamtintensität hinter der FK-Linse dar und ist in Abb. 4.24 zusammen mit den aus Simulationen ermittelten Werten dargestellt.

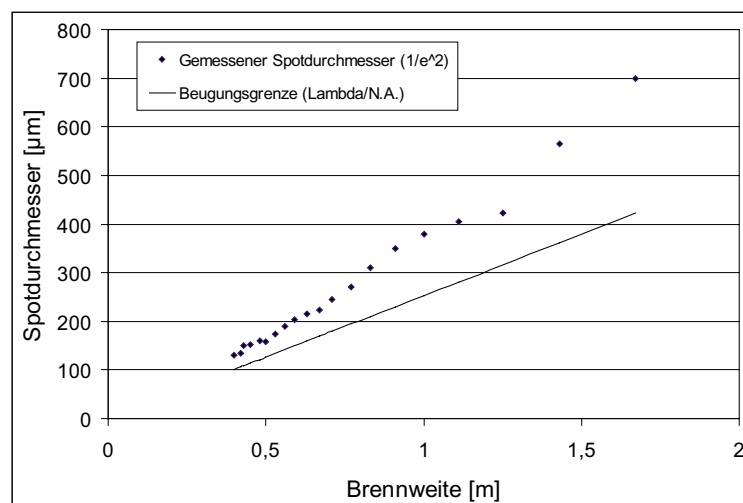
Die Fokuseffizienz ist, wie durch Messungen und Simulationen gezeigt, stark von der Brennweite abhängig. Für kurze Brennweiten können die feinen, äußeren Zonen des Fresnelprofils nicht mehr durch die Phasenplateaus über den Elektroden angenähert werden. Es kommt zu Beugung in höhere Ordnungen und somit zu einem Intensitätsverlust im Fokus.

Zur Bestimmung der Spotgröße kam das bei der CLC-Linse vorgestellte Knife-Edge-Verfahren zum Einsatz. Hierzu wird eine Schneide durch den Fokus gefahren und die Intensität



**Abb. 4.24:** Beugungswirkungsgrad von binären und geblazten ADLC-Linsen

hinter der Schneide gemessen. Die so ermittelten Fokusdurchmesser einer geblazten ADLC-Linse für verschiedene Brennweiten sind in Abb. 4.25 dargestellt. Die gestrichelte Linie stellt die Beugungsgrenze nach dem Rayleigh-Kriterium ( $\lambda/N.A.$ ) dar. Alle Messungen wurden bei einer Wellenlänge von 632.8 nm durchgeführt.



**Abb. 4.25:** Fokusdurchmesser einer geblazten ADLC-Linse bei verschiedenen Brennweiten

Um Aussagen über die Form des Fokusspots treffen zu können, wurden die Foki mittels einer CCD-Kamera aufgezeichnet. Abb. 4.29 zeigt die gemessenen Foki unter Verwendung geblazter wie binärer Fresnelprofile bei Brennweiten von  $F=100$  cm und  $F=50$  cm. Neben einer leichten horizontalen Fokusdeformation, bedingt durch den Bereich der Zuführ-

elektroden, lässt sich ein annähernd gaußförmiger Fokusspot erkennen. Die Bestimmung des Spotdurchmessers ( $1/e^2$ ) ergibt auch mit dieser Methode bei geblazten Profilen einen Wert nahe der Beugungsgrenze.

### Übersprechen zwischen Elektrodenringen

Wie bei Dickmann [56] beschrieben, kann es bei einer ungünstigen Elektrodengeometrie zu unerwarteten Molekülausrichtungen über Elektrodenflächen, sog. *Inversionswänden*, kommen. Diese erzeugen Phasenfehler und können die Fokuseffizienz reduzieren. Zur Überprüfung dieses Sachverhaltes wurden verschiedene ADLC-Linsen unter gekreuzten Polarisatoren in einem Mikroskopaufbau untersucht, wobei zusätzliches Augenmerk auf das Übersprechen zwischen Elektrodenringen gelegt wurde. Abb. 4.30 zeigt den Phasenhub zweier Ringelektroden (hell) bei verschiedenen Ansteuerspannungen.

Alle unbeteiligten Elektroden wurden geerdet. Es wurden im Rahmen der verwendeten Ansteuerspannungen im Bereich von 0-40 V keine Inversionswände festgestellt. Bei kleinen Spannungen traten jedoch einige Randeffekte an den Elektrodenkanten auf. Ab einer Spannung von 5 V war der Phasenhub über der gesamten Elektrodenfläche homogen. Auch bei hohen Feldern trat kein Übersprechen zwischen Elektroden auf. Dies zeigt, dass die gewählten Designparameter der Elektrodenbreiten und die Abstände sinnvoll gewählt wurden.

Mit dem Konzept der ADLC-Linse ist es gelungen, ein im Vergleich zur CLC-Linse (Abschn. 4.3) deutlich schnelleres FK-Element zu entwickeln. Ein weiterer Vorteil der ADLC-Linse besteht darin, dass ihre Schaltcharakteristik symmetrisch und brennweitenunabhängig ist. In den Punkten Fokusqualität und Fokuseffizienz ist sie der CLC-Linse jedoch unterlegen.

## 4.5 Vermessen des Gesamtsystems

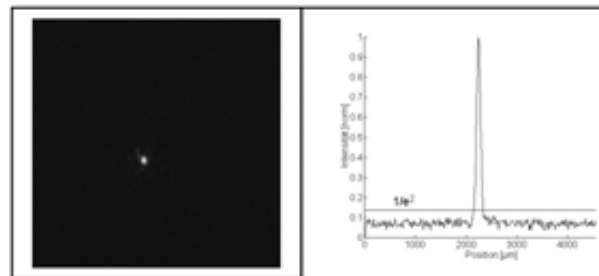
Um die Tragfähigkeit des entwickelten Pickup-Konzeptes nachzuweisen, wurden Demonstratoren (Abbildungen 4.31 und 4.32) aufgebaut und im Detail charakterisiert. Die diffraktiven optischen Elemente (DOEs), deren Vermessung bei Dias [57] beschrieben ist, zeigten hohe Beugungseffizienzen und eine sehr gute Polarisationsstrennung. Die Vermessung der DOEs im Gesamtsystem ist bei Stankovic [33] zu finden. Ein ganz wesentliches Resultat dabei war, dass mit einem mit DOEs aufgebauten Pickup-System ein hochfrequentes Datensignal von der Disk erhalten werden konnte. Damit wurde demonstriert, dass die Wellenfront durch den Einsatz von DOEs nicht verschlechtert wird, was auch durch Messungen des auf der Datenschicht auftreffenden Fokusspots im Sub-Mikrometerbereich bestätigt werden konnte [58].

Im Folgenden werden Messungen zum Pickup-System mit DOEs und FK-Elementen dargestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurden. Abb. 4.33 demonstriert die Funktion des Systems, auf beide Datenschichten gleichzeitig zugreifen und Dicken-

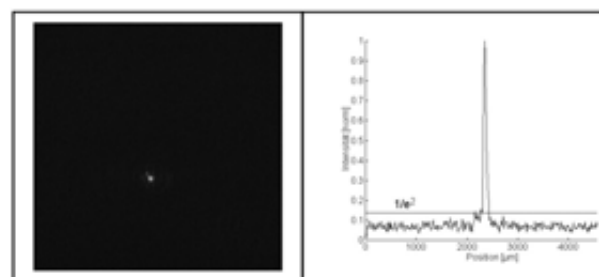
schwankungen der Zwischenschicht ausgleichen zu können. Jedes Bild zeigt zwei Graphen, die zu den beiden Detektoren gehören und folglich den Signalen von verschiedenen Datenschichten entsprechen. Die Signale wurden mit axial bewegter DVD-Linse und nicht drehender Disk aufgenommen, ohne Autofokus- und Spurregelung. Zur Untersuchung der Fokuspachregelung wird die Objektivlinse entlang der optischen Achse verfahren. Die beiden vorderen S-Kurven in jedem der Graphen wurden aus dem Fokussignal am Quadrantendetektor (siehe Abschn. 4.1) beim Hindurchtreten durch die erste und zweite Datenschicht erzeugt. Die beiden hinteren S-Kurven entstanden auf dem Rückweg. In Abb. 4.33 a sind die beiden Graphen gleich, da kein Flüssigkristallelement im System eingebaut ist und TM- und TE-polarisiertes Licht deshalb in gleicher Weise fokussiert wird. In Abb. 4.33 b ist eine CLC-Linse im System eingebaut und bewirkt eine Brennweitenverschiebung von  $55\text{ }\mu\text{m}$  zwischen den Foki für TE- und TM-polarisiertes Licht. Man erkennt, dass, wenn TM-polarisiertes Licht auf die untere Schicht fokussiert wird (erste S-Kurve des oberen Graphen in Abb. 4.33 b), TE-polarisiertes Licht auf die obere Schicht trifft (zweite S-Kurve des unteren Graphen). In den Abbildungen 4.33 c und 4.33 d leistet die zusätzlich eingebaute ADLC-Linse eine maximale Fokusverschiebung von  $+25$  und  $-25\text{ }\mu\text{m}$ . In Abb. 4.33 c erreicht der Fokus für TM-polarisiertes Licht die obere Schicht, bevor TE-polarisiertes Licht auf der unteren Schicht fokussiert wird. Dies zeigt, dass der Abstand der Foki größer ist als der Abstand zwischen den Datenschichten, während in Abb. 4.33 d der Abstand der Foki kleiner ist.

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, auf beide Schichten des Datenträgers gleichzeitig zu fokussieren und, für den Fall eines sich ändernden Schicht-Abstandes, eine Nachführung durchzuführen. Für dynamische Tests waren die eingesetzten FK-Linsen noch zu langsam.

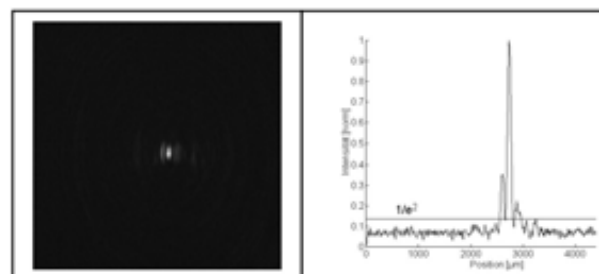
Die in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie im Projekt *Neuer optischer Schreib-/Lesekopf für die optische Disk* (FKZ 01 BS 609/0) gefördert.



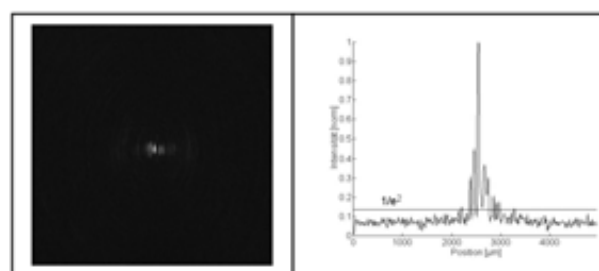
**Abb. 4.26:** Fokus einer geblasen ADLC-Linse mit  $F=100$  cm



**Abb. 4.27:** Fokus einer geblasen ADLC-Linse mit  $F=50$  cm

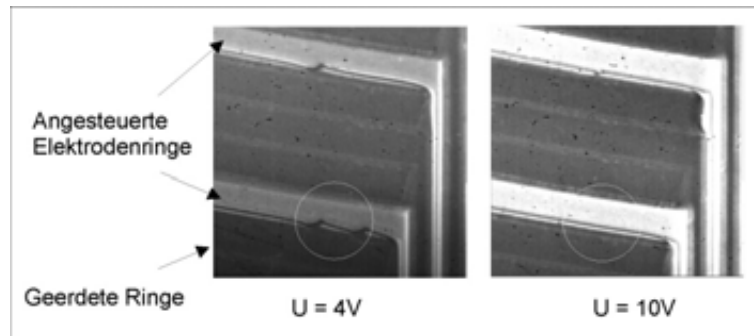


**Abb. 4.28:** Fokus einer binären ADLC-Linse mit  $F=100$  cm

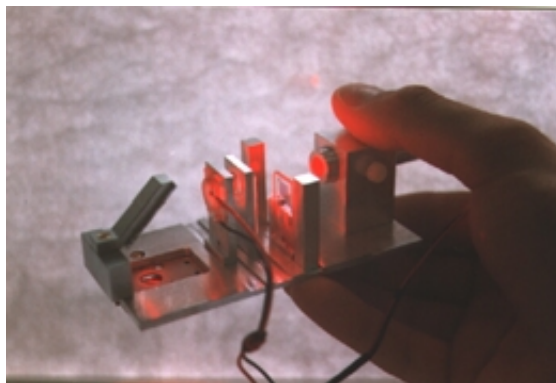


**Abb. 4.29:** Fokus einer binären ADLC-Linse mit  $F=50$  cm





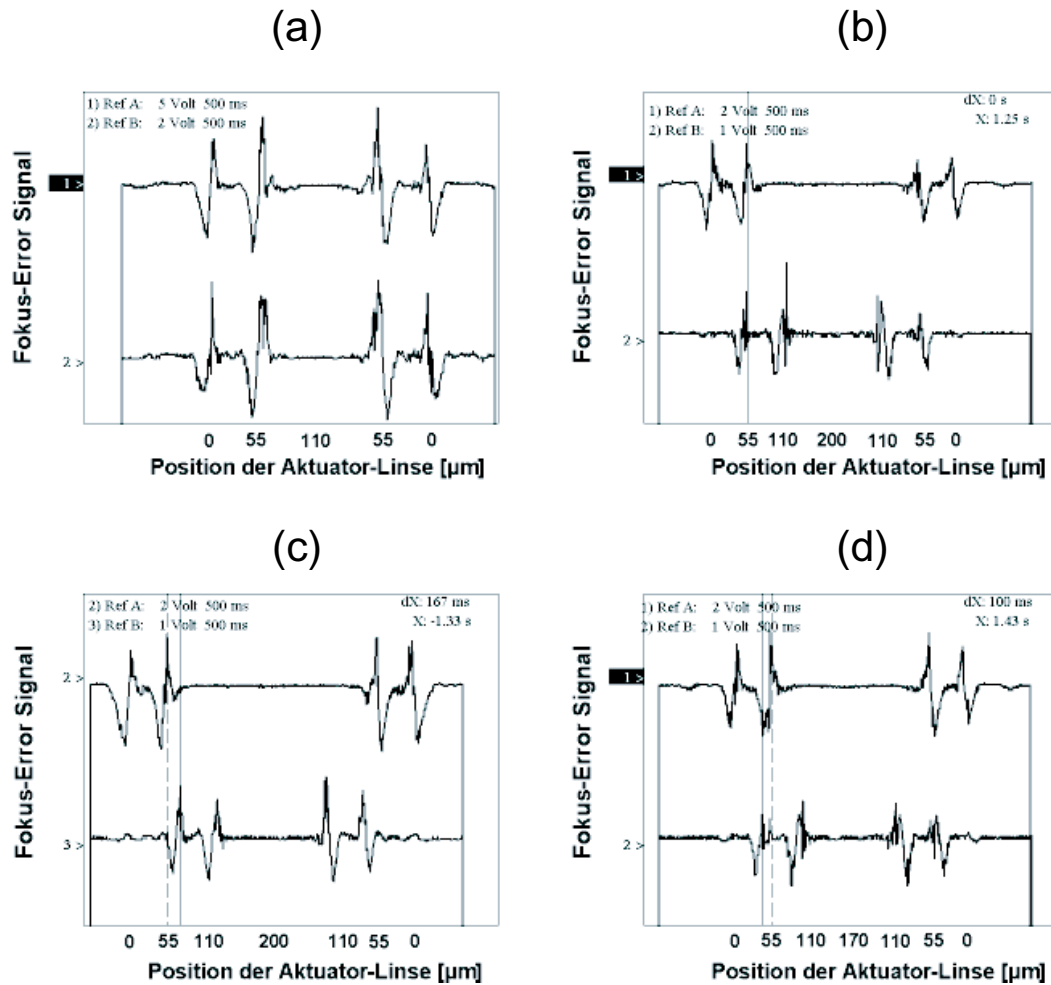
**Abb. 4.30:** Geschaltete Elektroden unter dem Polarisationsmikroskop bei 4 V (links) und 10 V (rechts)



**Abb. 4.31:** Erster Prototyp zur Demonstration der optischen Funktionalität



**Abb. 4.32:** Zweiter Prototyp, ausgerüstet mit zusätzlichen Quadranten-Detektoren und Detektoroptiken zur Signalauswertung



**Abb. 4.33:** Gemessene S-Kurven von beiden Datenschichten. In den Abbildungen entspricht die obere Kurve TM-Polarisation, die untere Kurve TE-Polarisation

## 5 Neues optisches Laufwerk für BluRay-Disks

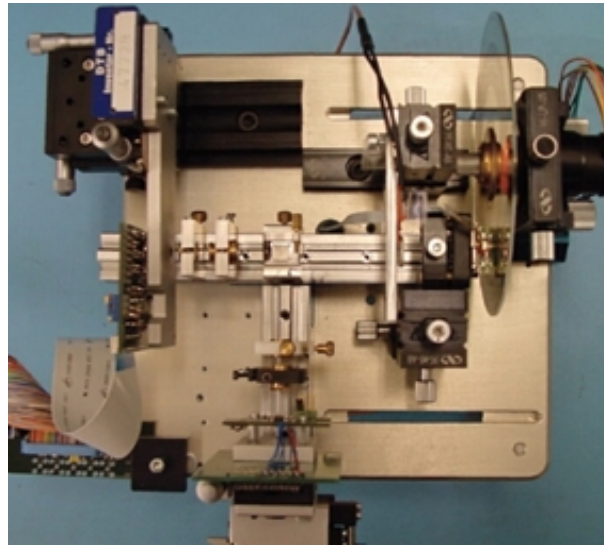
Im Rahmen des BMBF-Projektes *BlueSpot* wurde in Zusammenarbeit mit der Deutschen Thomson Brandt (DTB) an der Entwicklung eines neuen optischen Abtasters für die voraussichtlich 2003/2004 auf den Markt kommende nächste DVD-Generation, die sog. BluRay-Disk, gearbeitet. Hierbei wurde erstmals versucht, FK-Elemente zur Korrektur von Wellenfrontfehlern in einem mikrooptischen System, das als Massenprodukt konzipiert ist, einzusetzen. Durch die hohen Anforderungen der zu entwickelnden Laufwerke (N.A.=0.85, beugungsbegrenzt, geringe Fertigungs- und Justagetoleranzen) wurden auch hohe Anforderungen an das FK-Element gestellt. Neben geringen Wellenfrontfehlern (kleiner  $\lambda/30$  rms) sowohl im ein- wie ausgeschaltetem Zustand sollte der Wirkungsgrad des Elements über 90 %, die Transmission des Elements über 85 % liegen. Um einen Wirkungsgrad in dieser Größenordnung zu realisieren, musste das Phasenprofil optimal an die zu korrigierende Wellenfront angepasst werden. Hierfür wurden Simulationen am optischen Laufwerk durchgeführt und die gewonnenen Ergebnisse bei der Konzeption des Elektrodenlayouts mit berücksichtigt. Die Steigerung der Transmission konnte durch Optimierung des Mehrschichtsystems (Glas, ITO, Polyimid, FK) und durch den Einsatz von Antireflexschichten erreicht werden. Neben hohen optischen Anforderungen sollte eine möglichst einfache Ansteuerung des FK-Elements realisiert werden. Dies war vor allem bei den komplexen Phasenprofilen (z. B. Koma) eine Herausforderung und erst durch den Einsatz von sog. *Meshing*-Techniken zu bewerkstelligen. Zum besseren Verständnis wird in Abschn. 5.1 das neue Laufwerkskonzept vorgestellt und auf die entstehenden Wellenfrontfehler eingegangen. In den Abschnitten 5.3, 5.4 und 5.5 werden die zur Korrektur entwickelten FK-Elemente vorgestellt. Simulationsrelevante Aspekte werden im Rahmen dieser, fertigungsrelevante im Rahmen der Dissertation von S. Somalingam [59] dargestellt. Neben der Berechnung und Simulation der Elemente werden Messungen zur optischen Performance und abschließende Untersuchungen an einem Laufwerks-Prototypen vorgestellt, der die hier entwickelten Kompensationselemente enthält.

### 5.1 Das BluRay-Laufwerk

1998 wurde die DVD als Nachfolger der VHS-Kassette präsentiert und mittlerweile zum Videostandard erhoben. Der Nachfolger, die so genannte BluRay-Disk, soll bei weiter fallenden Preisen für blaue Laserdioden Ende 2003, Anfang 2004 mit einer Speicherkapazität

von bis zu 50 GB auf den Markt kommen. Die Steigerung der Kapazität wird hierbei durch Modifikationen des optischen Laufwerks sowie der Disk erreicht. Die wesentlichen Modifikationen bei der Optik sind die Reduktion der Wellenlänge von 650 nm auf 405 nm, die Erhöhung der Numerischen Apertur (N.A.) der Objektivlinse von 0.6 auf 0.85 sowie die Integration einer dynamischen Aberrationskorrektur. Bei der BluRay-DVD erreicht man die höhere Datendichte durch Reduktion der Pit- und Strukturbreiten. Hinzu kommen neue Verschlüsselungs- und Fehlerkorrektur-Algorithmen [60].

Zum Testen der entwickelten Kompensationselemente wurde bei der DTB ein dynamisches Testlaufwerk aufgebaut, das in Abb. 5.1 dargestellt ist. Der Aufbau ist hierbei so realisiert, dass möglichst alle Einzelkomponenten zu Testzwecken ausgetauscht werden können.



**Abb. 5.1:** Aufgebauter Tester bei DTB mit sphärischem Kompensationselement

Als Lichtquelle kam eine Laserdiode der Fa. Nichia (30 mW,  $\lambda=405$  nm) zum Einsatz. Die Objektivlinse war ein Zweilinser mit einer N.A von 0.85, der auf DVD-Substratdicken von 100  $\mu\text{m}$  optimiert war. Das optische Signal beim Auslesen einer Disk entsteht durch Interferenz des vom Spurrand und den Pits ( $\lambda/4$  tief) reflektierten Lichtes (siehe Abb. 5.2). Besitzt die auftreffende Wellenfront Aberrationen, kommt es zu einer Reduktion der Intensitätsmodulation und somit zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Durch die im Vergleich zur DVD kürzeren Wellenlängen und höheren System N.A. nimmt die Empfindlichkeit des optischen Systems gegenüber Aberrationen nach Stallinga [61] um die Größe

$$\text{Aberrationen} \sim d/\Delta\lambda) \cdot \Delta(N.A.)^m \quad (5.1)$$

zu. Hierbei ist  $d$  die Substratdicke über der Datenschicht und  $m$  ein von der Aberration abhängiger Parameter. Für Astigmatismus und Defokus ist  $m=2$ , für Koma  $m=3$  und für sphärische Aberrationen  $m=4$ .

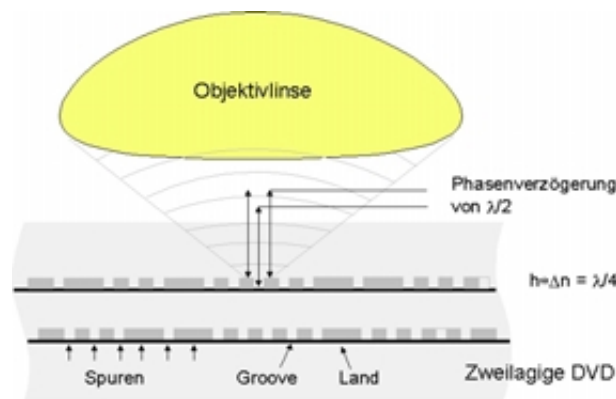


Abb. 5.2: Entstehung der Signalmodulation auf der Disk

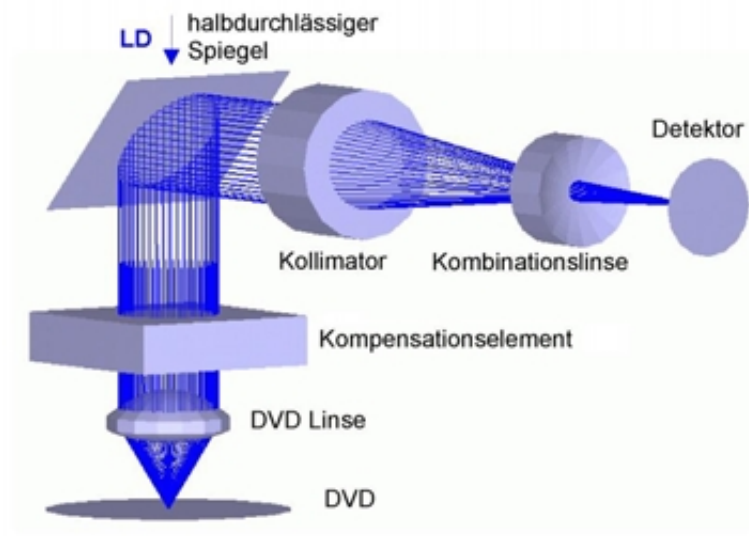
## 5.2 Simulationen

Um eine Aussage über die genauen Aberrationen machen zu können, war es notwendig, das optische System vollständig zu simulieren. Hierzu kam das Raytracingprogramm *Zemax* zum Einsatz. Zu Beginn des Projektes waren erst wenige Daten über die eingesetzten Linsen (Kollimatorlinse, Objektivlinse) bekannt, wodurch im ersten Projektabschnitt eigene Linsendesigns entworfen und für Simulationen herangezogen wurden. Die schwierigste Komponente stellte hierbei die Objektivlinse mit ihrer hohen N.A. dar, da sich die Größe der auftretenden Aberrationen bei verschiedenen Linsendesigns stark änderte. Im Laufe des Projektes wurden die erforderlichen Systemdaten von der DTB zur Verfügung gestellt. Abb. 5.3 zeigt ein in *Zemax* modelliertes Optikmodul. Alle optischen Komponenten wurden hierbei auf eine Wellenlänge von 405 nm sowie eine Systemapertur von 0.85 ausgelegt. Das Arbeitsprinzip ist bis auf die zusätzlich integrierte Phasenkorrektur (Kompensationselement) mit dem in Abschn. 4.1 vorgestellten DVD-Laufwerk identisch. Zur Simulation der FK-Elemente wurde der in Abb. 5.4 dargestellte Strahlengang betrachtet.

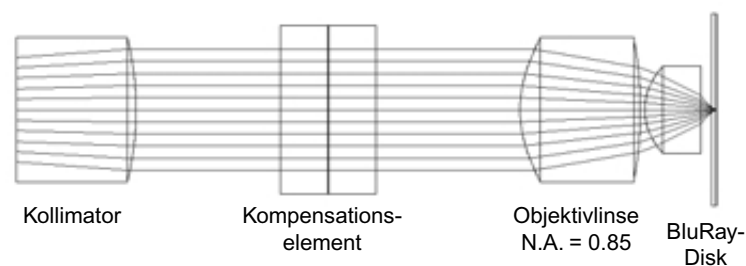
Beim Auslesen einer Disk kommt es aufgrund der gestiegenen Empfindlichkeit gegenüber Aberrationen im laufenden Betrieb zu zwei besonders kritischen Umständen, die nun besprochen werden.

### 5.2.1 Auftreten von sphärischen Aberrationen

Die Objektivlinse ist auf die Erzeugung eines minimalen Fokus auf der hinteren Datenschicht optimiert. Beim Wechsel von der hinteren auf die vordere Datenschicht entstehen wegen der 20  $\mu\text{m}$  dicken Zwischenschicht aus Polycarbonat sphärische Aberrationen, die ein Auslesen der vorderen Datenschicht verhindern. Da die Objektivlinse nur auf eine Substratdicke und somit nur auf das Auslesen einer Datenschicht optimiert werden kann, muss beim Umschalten eine Korrektur der auftretenden sphärischen Aberrationen erfolgen. Beim



**Abb. 5.3:** Schematische Darstellung des BluRay-Optikmoduls mit Kompensationselement



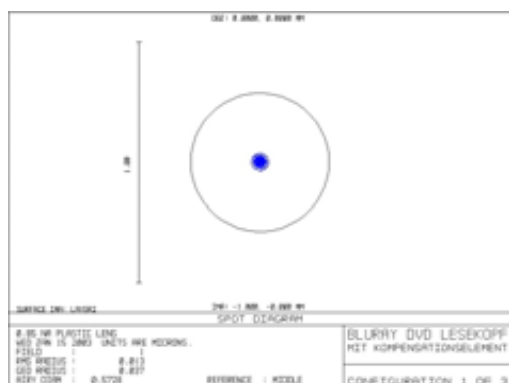
**Abb. 5.4:** Zentraler Teil des Optikmoduls

Fokussieren auf die hintere Datenschicht (Substratdicke  $100\ \mu\text{m}$ ) ist das System optimal konfiguriert. Abb. 5.5 zeigt den für die hintere Datenschicht simulierten Fokusspot, Abb. 5.6 dessen Wellenfrontquerschnitt.

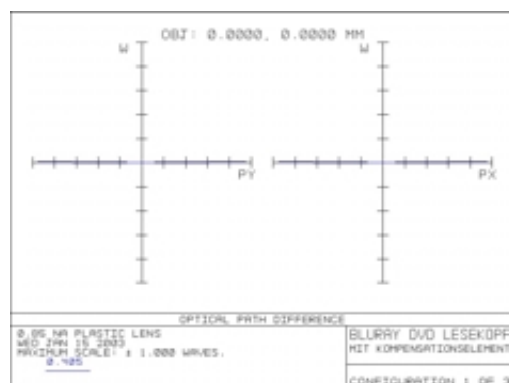
Der Fokus ist in dieser Konstellation, wie am eingezeichneten Ring (erstes Minimum des Airypatterns) zu erkennen, beugungsbegrenzt. Der geometrische Spotdurchmesser beläuft sich auf  $0.37\ \mu\text{m}$ , die Wellenfrontfehler auf  $0.012\ \lambda$  (P-P).

Zum Fokussieren auf die vordere Datenschicht ( $80\ \mu\text{m}$  Substratdicke) wird die Objektivlinse um  $10.4\ \mu\text{m}$  nach hinten verschoben, wobei der kleinstmögliche Fokusspot (siehe Abb. 5.7) erreicht wird. Der geometrische Fokussdurchmesser ist hierbei auf  $7.8\ \mu\text{m}$ , die Wellenfrontfehler auf  $0.6\ \lambda$  (P-P) angewachsen (siehe Abb. 5.8), was ein Auslesen der vorderen Schicht unmöglich macht.

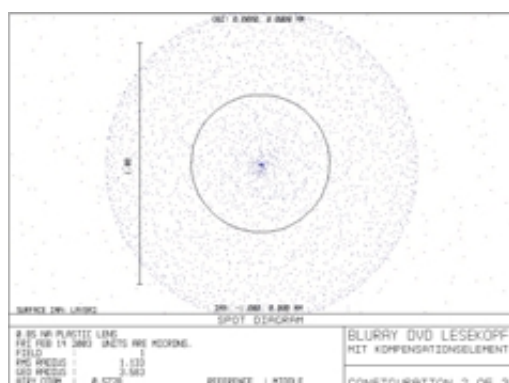
Durch Einführen eines Kompensationselementes vor der Objektivlinse ist eine Korrektur der Wellenfront möglich. Je nach Position der Objektivlinse können hierzu zwei verschie-



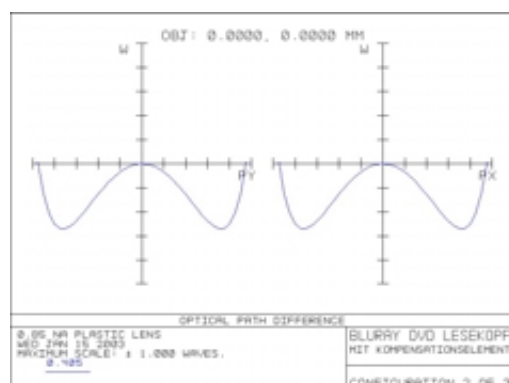
**Abb. 5.5:** Fokusspot auf der hinteren Datenschicht bei optimaler Fokussierung.



**Abb. 5.6:** Schnitt durch die Wellenfront in x- und y-Richtung



**Abb. 5.7:** Fokusspot auf der vorderen Datenschicht ohne Korrektur der sphärischen Aberrationen

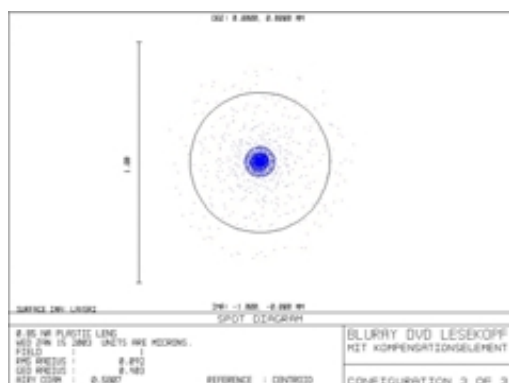


**Abb. 5.8:** Schnitt durch die Wellenfront in x- und y-Richtung

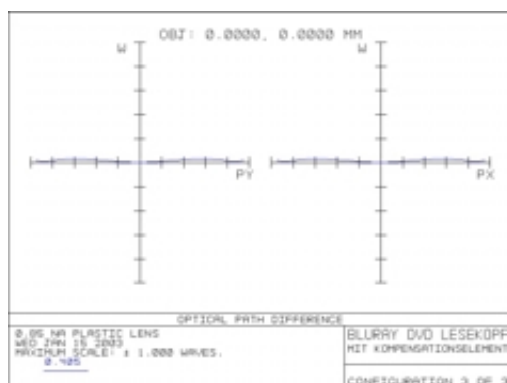
dene Korrekturprofile eingesetzt werden, ein sphärisches Profil mit einer Brennweite von  $F=288$  mm sowie ein doughnutförmiges Profil mit einem maximalen Phasenhub kleiner  $1 \lambda$  ( $d=3.7$  mm). Das sphärische Profil wurde hierbei durch Einführen einer Linse, das doughnutförmige Profil mit Hilfe einer Phasenmatrix simuliert. Der so korrigierte und wieder beugungsbegrenzte Fokusspot ist in Abb. 5.9, die korrigierte Wellenfront in Abb. 5.10 dargestellt.

Gegenüber den Simulationen wurde bei Messungen im aufgebauten DTB-Testlaufwerk eine Korrekturbrennweite von  $F=400$  mm ermittelt. Die Abweichungen traten trotz mehrfacher Überprüfung der Simulationsergebnisse sowohl bei DTB wie bei uns auf und sind vermutlich auf fehlerhafte Daten bei der asphärischen Objektlinse zurückzuführen. Für die hergestellten FK-Elemente wurde daher auf eine Designbrennweite von  $F=400$  mm optimiert.

Aufgrund eines geringeren Phasenhubs von kleiner als einer Wellenlänge und den damit verbundenen Vorteilen (dünnere Zellen  $\rightarrow$  kürzere Schaltzeiten, bessere Transmission, etc.)



**Abb. 5.9:** Fokusspot auf der vorderen Datenschicht nach Korrektur der sphärischen Aberrationen

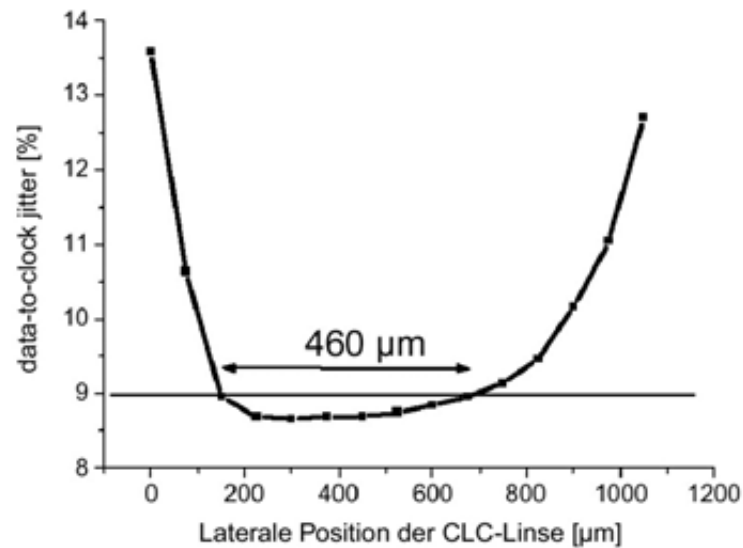


**Abb. 5.10:** Schnitt durch die Wellenfront in x- und y-Richtung

bietet sich zunächst ein Kompensationselement mit doughnutförmigem Phasenprofil an. Die Simulationsergebnisse zeigten jedoch, dass ein solches Element eine nur geringe laterale Verschiebetoleranz im  $\mu\text{m}$ -Bereich gegenüber der Objektivlinse besitzt. Aufgrund der relativ großen Auslenkungen der Objektivlinse bei der Spurnachführung im Bereich von einigen 100  $\mu\text{m}$  muss ein solches Kompensationselement auf dem Aktuator montiert werden, was wiederum wegen der größeren Masse zu Ungunsten der Nachführ- und der späteren Lesegeschwindigkeit geht. Ein Kompensationselement mit sphärischem Phasenprofil zeigte sich gegenüber Verschiebungen der Objektivlinse als tolerant und konnte so direkt im Strahlengang untergebracht werden. Dies bestätigten auch Messungen in dem von DTB entwickelten Testlaufwerk. Die dort gemessenen Verschiebetoleranzen eines sphärischen Kompensationselementes (CLC-Linse) sind in Abb. 5.11 dargestellt.

Die laterale Verschiebung ist hier gegenüber dem gemessenen Jitterwert aufgetragen. Dieser ist ein Maß für die Qualität des Auslesesignals und wird aus dem gemessenen Eyepattern (siehe Abb. 5.41) ermittelt. Das Eyepattern zeigt die Überlagerung aller Frequenzen, die durch das Abtasten der unterschiedlichen Pit-Längen erzeugt werden. Wird das Eyepattern unscharf, so wird die Unterscheidung der einzelnen Pit-Längen schwierig, der Jitterwert steigt. Bei Werten größer 13 % ist ein Auslesen der Spur nicht mehr möglich. Gute Laufwerke besitzen unter Verwendung herkömmlicher Equalizer, die die Normierung der Amplituden der einzelnen Frequenzen im Eyepattern übernehmen, Jitterwerte kleiner 9 %. Die speziell für die BluRay-Disk entwickelte neue Generation von Equalizern, so genannte *Limited Equalizer*, erlauben eine Verbesserung des Jitterwertes um ca. 3 %, was die Toleranz des Systems gegenüber Aberrationen erhöht, eine Korrektur sphärischer Aberrationen jedoch weiterhin notwendig macht.

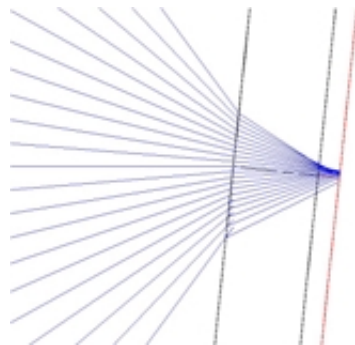




**Abb. 5.11:** Gemessene Verschiebetoleranzen einer CLC-Linse gegenüber der Objektivlinse (NA=0.85), gemessen im DTB-Testlaufwerk

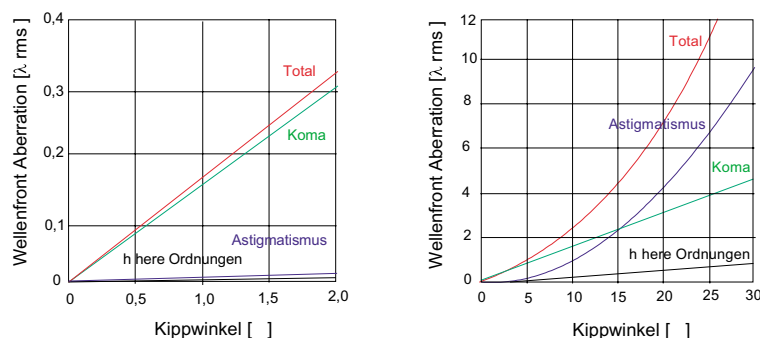
### 5.2.2 Auftreten von Koma

Durch fertigungs- und nutzungsbedingte Durchbiegungen der Disk kommt es im Betrieb zu radialen und tangentialen Verkipptungen der Disk. Der sich in der Disk ergebende Strahlverlauf ist in Abb. 5.12 dargestellt.



**Abb. 5.12:** Strahlengang bei einer verkippten Disk

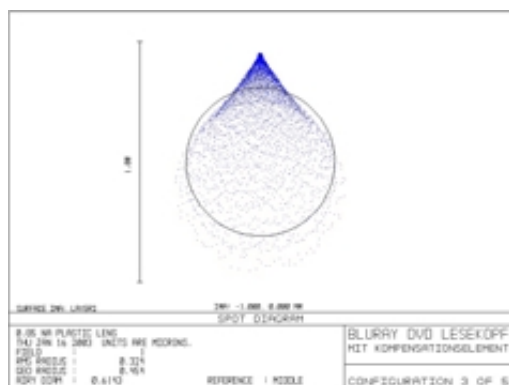
Je nach Kippwinkel entstehen auf der Datenschicht Aberrationen wie Koma, Astigmatismus sowie Aberrationen höherer Ordnungen. Für die im Betrieb relevanten Diskverkipptungen von  $0.3^\circ$  in radialer und  $0.6^\circ$  in tangentialer Richtung spielt Koma die wesentliche Rolle (siehe Abb. 5.13).



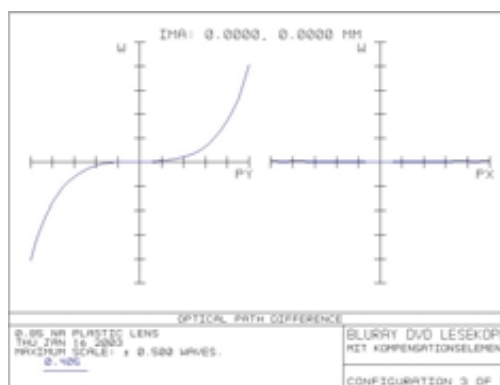
**Abb. 5.13:** Auftretende Aberration bei kippender Disk

Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen die bei einer Diskverkipfung von  $0.6^\circ$  auftretende Fokusspotdeformation und den entstehenden Wellenfrontfehler von  $0.8 \lambda$  (P-P). Um beides zu korrigieren, kam eine mittels *Matlab* optimierte Phasenmatrix (Abb. 5.16) zum Einsatz, die vor der Objektivlinse platziert wurde. Die durch diese Korrekturphase erhaltenen Verbesserungen beim Fokusspot sowie der Wellenfront sind in den Abbildungen 5.17 und 5.18 dargestellt. So konnten durch Einbringen der Korrekturphase der geometrische Fokussdurchmesser von  $0.45$  auf  $0.19 \mu\text{m}$ , die Wellenfrontfehler von  $0.8$  auf  $0.1 \lambda$  (P-P) reduziert werden.

Zum Erzeugen der sphärischen und komaformigen Korrekturphasen wurden verschiedene FK-Elemente hergestellt, die in nun im Detail besprochen werden.



**Abb. 5.14:** Unkorrigierter Fokusspot einer um  $0.6^\circ$  verkippten Disk



**Abb. 5.15:** Schnitt durch die Wellenfront in x- und y-Richtung

### 5.3 Sphärisches Kompensationselement

Wie in Abschn. 5.2.1 gezeigt, lassen sich die Wellenfrontfehler auf der vorderen Datenschicht durch Einfügen einer Linse der Brennweite  $F=288 \text{ mm}$  ( $F=400 \text{ mm}$ ) bzw. durch ein Ele-

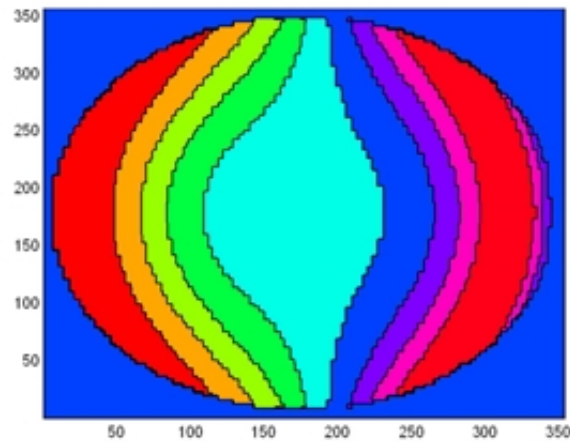


Abb. 5.16: Korrekturphase

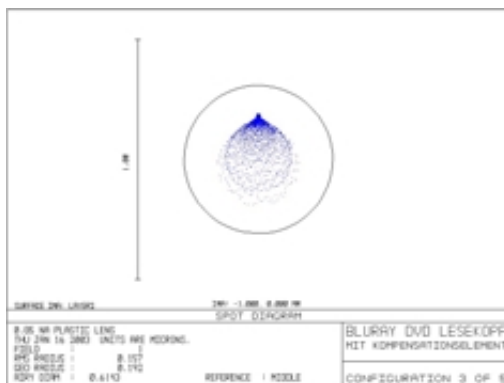


Abb. 5.17: Korrigierter Fokus durch Einsatz der in Abb. 5.16 dargestellten Korrekturphase

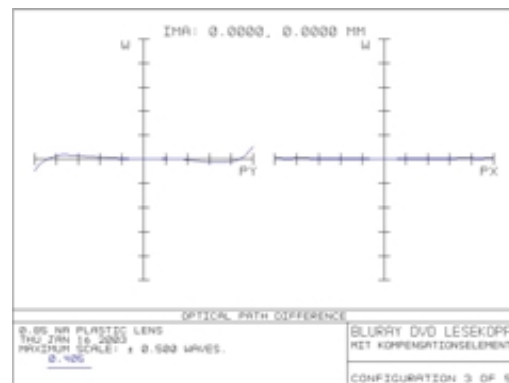


Abb. 5.18: Schnitt durch die Wellenfront in x- und y-Richtung

ment mit sphärischem Phasenprofil gleicher Brennweite kompensieren. Um die Brennweite dynamisch variieren zu können, kamen zwei unterschiedliche FK-Elemente, eine verbesserte CLC-Linse (siehe Abschn. 5.4) und ein planares Kompensationselement mit sphärischem Brechungsindexprofil, das so genannte *Sphärische Kompensationselement*, zum Einsatz. Dieses wurde entwickelt, um die aufwändige Herstellung beim Bau von CLC-Linsen zu umgehen.

### 5.3.1 Aufbau

Das sphärische Kompensationselement hat denselben Aufbau wie die in Abschn. 4.4 vorgestellte ADLC-Linse. Es besteht aus zwei parallelen Glasplatten mit einseitig aufgetragener

Elektrodenstruktur und gegenüberliegender homogener Flächenelektrode. Zwischen den Elektrodenflächen bildet sich eine Feldverteilung und erzeugt in der eingeschlossenen FK-Schicht eine Brechungsindexverteilung, die die Wellenfront des durchstrahlenden Lichtes moduliert. Gegenüber der ADLC-Linse wurde hier ein rein sphärisches Profil (keine Fresnelzonen) erzeugt, wodurch die Zelldicke des Elementes an die Brennweite angepasst werden musste. Der Phasenhub einer planaren FK-Zelle ist gegeben durch

$$\phi = \frac{2\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda} \quad (5.2)$$

wobei  $\Delta n$  die durch Spannung erzeugte Brechungsindexänderung des FKs und  $d$  die Dicke der FK-Schicht beschreibt. Durch Umformen von Gl. 5.2 nach  $d$  kann die Dicke der FK-Schicht und damit die Spacerdicke zum Bau der FK-Zelle bestimmt werden. Hierzu ist es notwendig, den benötigten maximalen Phasenhub  $\phi_{max}$  zu kennen. Dieser wird durch die Brennweite  $F$  der sphärischen Wellenfront bestimmt und ist gegeben durch

$$\phi_{max} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [F - \sqrt{F^2 - r^2}] \quad (5.3)$$

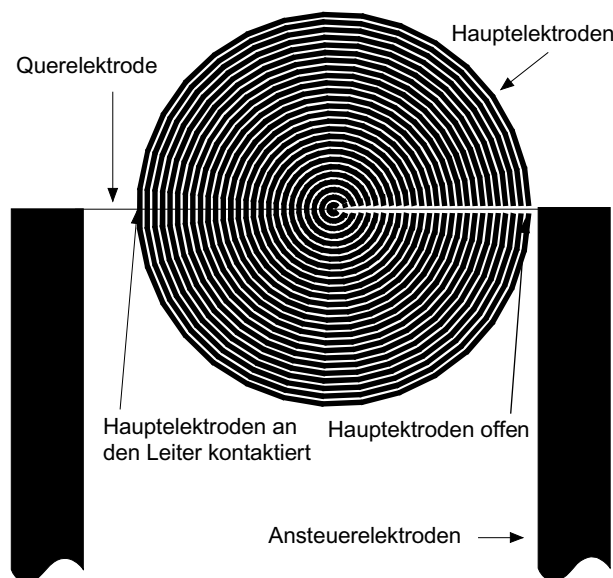
wobei  $r$  dem Radius der aktiven Zone des sphärischen Kompensationselementes entspricht. Für eine Brennweite  $F=400$  mm bei einem Durchmesser von  $r=1.85$  mm muss ein maximaler Phasenhub von  $11.4 \lambda$  realisiert werden, was unter Verwendung des FKs BL006 mit  $\Delta n=0.39$  ( $\lambda=0.405 \mu\text{m}$ ) mit Gleichung 5.2 zu einer Zelldicke von mindestens  $11.6 \mu\text{m}$  führt. Zur Realisierung kürzerer Brennweiten bis zu 300 mm wurden verschiedene Zellen mit einer Dicke von 12, 25 und  $36 \mu\text{m}$  hergestellt.

### 5.3.2 Elektrodendesign

Ziel des Elektrodendesigns war die Erzeugung eines geeigneten Potentialverlaufs über der Elektrodenfläche, um durch die im FK erzeugte Brechungsindexänderung sphärische Phasenprofile mit Brennweiten von  $F=288$  mm bis unendlich zu erzeugen. Beim Design des Elektrodenlayouts wurde versucht, auf die Anforderungen der Industrie besonders einzugehen. Diese waren im Einzelnen:

- Realisierung einer dynamischen Brennweitenänderung (von  $F=288$  mm  $\rightarrow \infty$ )
- Eine effiziente Ansteuerung mit möglichst wenig Ansteuerelektroden
- Geringe Leistungsaufnahme
- Hoher Wirkungsgrad
- Hohe Transparenz
- Kostengünstige und einfache Herstellung

Sämtliche Anforderungen konnten durch Integration und Weiterentwicklung von sog. *Mes-  
hing*-Techniken [48] im Elektrodendesign realisiert werden. Es wurden hierbei weiterführende  
Konzepte entwickelt, um auch nicht-lineare Potentialverläufe in einer Elektrodenstruktur  
zu generieren. Abb. 5.19 zeigt das so realisierte Elektrodenlayout.



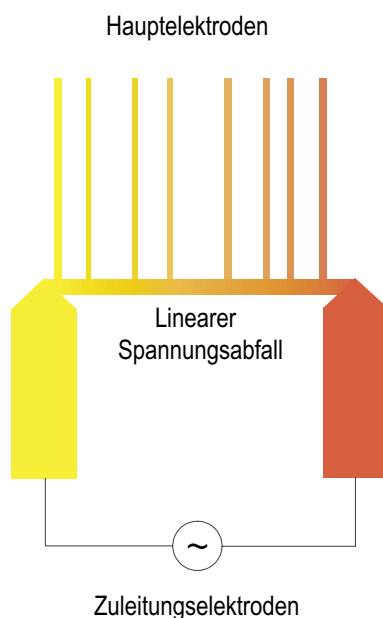
**Abb. 5.19:** Layout des sphärischen Kompensationselementes

Dieses besteht wie bei der ADLC-Linse aus konzentrisch angeordneten, ringförmigen Hauptelektroden. Da hier die Schaltzeiten unkritisch waren, konnte durch den Einsatz eines zwischen 10 und 20  $\lambda$  hohen sphärischen Phasenprofils (ohne Fresnelzonen) ein einfaches Ansteuerkonzept integriert werden. Hierbei wurden die bei der ADLC-Linse verwendeten Zuleitungen durch eine dünne Querelektrode ersetzt, die als integrierter Spannungsteiler fungierte. Die einzelnen Hauptelektroden greifen an verschiedenen Positionen der Querelektrode an und nehmen das dort lokal vorliegende Potential auf. Das andere Ende der Hauptelektroden bleibt unkontaktiert. Die ringförmigen Hauptelektroden stellen die später aktive Fläche dar. Die Anzahl der Ringe, ihre Breite sowie deren Zwischenräume ergeben sich aus dem benötigten Gesamtdurchmesser der aktiven Zone, der Brennweite (Krümmungsradius der Wellenfront), des sphärischen Profils und den vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten (Laserlithographie, Maskaligner, Ätzprozesse). Die Anforderungen an das Elektrodenlayout wurden durch aktuelle Tendenzen des sich in der Entwicklung befindlichen Laufwerkes häufig verändert. Eine ungeklärte Frage war zum einen der Durchmesser der Objektivlinse, zum anderen die Brennweite des Kompensationselementes, die von der noch nicht spezifizierten Dicke der DVD-Zwischenschicht abhing. Es wurden daher zwei unterschiedliche Elektrodenlayouts realisiert. Element 1 besitzt mit 50 Ringen bei Ringbreiten von 47  $\mu\text{m}$  und Zwischenräumen von 6.5  $\mu\text{m}$  einen Gesamtdurchmesser von 5.4 mm. Element 2 nutzt 33 Ringe (50/6  $\mu\text{m}$ ) und hat einen Gesamtdurchmesser von 3.7 mm. Während des letz-

ten Jahres einigte man sich auf einen Durchmesser der BluRay-Objektivlinse auf 3.5 mm, wodurch Element 2 zur Anwendung kam.

### Conductive Ladder Meshing (CLM)

Das hier eingesetzte Prinzip des *Conductive Ladder Meshings* beruht auf der Integration einer im Vergleich zu den Zuleitungen dünnen Elektrode, die aufgrund ihres geringen Durchmessers einen internen Spannungsabfall entlang ihres Verlaufs erzeugt und deren lokales Potential an verschiedenen Stellen mittels Hauptelektroden abgegriffen werden kann (siehe Abb. 5.20). Durch Einsatz dieser Technik ist es möglich, Spannungsabfälle in einer einlagigen und somit kostengünstig herzustellenden Elektrodenschicht zu erzeugen.



**Abb. 5.20:** Prinzip des Conductive Ladder Meshings

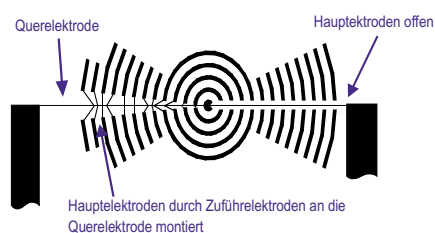
Der Widerstand eines flächigen Leiters kann durch Modifikation seiner Geometrie verändert werden. Will man einen effektiven Spannungsabfall generieren, der weitgehend über der Querelektrode, nicht aber über den Zuführelektroden abfällt, so muss das Verhältnis

$$\frac{\Delta U_{\text{Querelektrode}}}{\Delta U_{\text{Zuleitungen}}} = \frac{(L \cdot d)_{\text{Zuleitungen}}}{(L \cdot d)_{\text{Querelektrode}}} \quad (5.4)$$

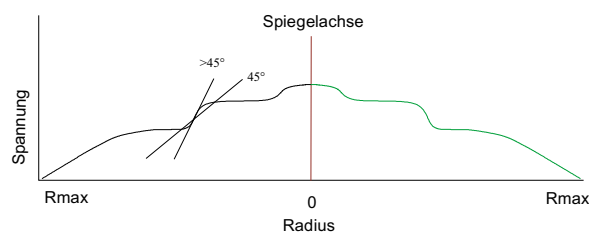
möglichst groß sein. Aufgrund dieses Verhältnisses wurde die Breite  $d$  der Querelektrode auf  $20 \mu\text{m}$  bei einer Länge  $L$  von einmal 4 und einmal 6 mm, die Zuführelektroden auf eine Breite von  $1000 \mu\text{m}$  bei einer Länge von 6 mm festgelegt, was einem Teilverhältnis von 500:1 entspricht. Um die Fläche der aktiven Zone möglichst optimal auszunutzen,

wurde die dünne Querelektrode direkt durch die aktive Zone gelegt. Gegenüber anderen Designs (ADLC-/EADLC-Linse) konnte hierdurch ein sich für die optische Performance negativ auswirkender Zuleitungsbereich in der aktiven Zone vermieden werden. Um ein Aufheizen der dünnen Querelektrode und somit des FKs zu unterbinden und um die Leistungsaufnahme des Elementes gering zu halten, kamen nur ITO-Schichten mit hochohmigem Flächenwiderstand zum Einsatz. Diese zeichnen sich des weiteren wegen der geringen Schichtdicke (3-10 nm) durch eine hohe Reintransmission ( $> 95\%$ ) und durch geringe Beugungsverluste an der fertigen Elektrodenstruktur aus.

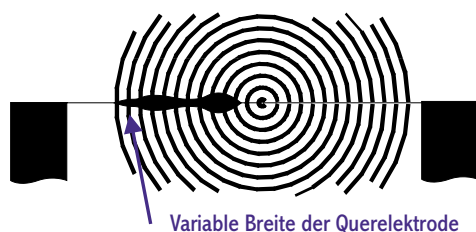
Um eine optimale Anpassung des sphärischen Phasenprofils auch bei verschiedenen Krümmungsradien zu erreichen, wurden zwei Abgriffsschemata zum Erzeugen nicht-linearer Spannungsabfälle untersucht [62], ohne dabei das Konzept der Querelektrode in der aktiven Zone aufgeben zu müssen. Konzept 1 sieht den Einsatz kurzer Zuführelektroden vor, die in nicht äquidistanten Abständen an der Querelektrode angreifen (siehe Abbildungen 5.21 und 5.22). Konzept 2 erzeugt die Nichtlinearität durch Variation der Querelektrodenbreite entlang ihres Verlaufs (Abbildungen 5.23 und 5.24). Das linke Bild zeigt das verwendete Elektrodenlayout, das rechte den radial erzeugten Spannungsabfall über den Hauptelektroden.



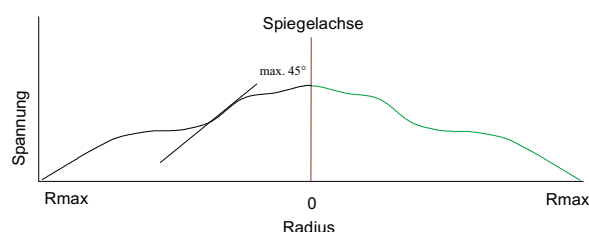
**Abb. 5.21:** Konzept 1: Abgriff durch kurze Zuführelektroden



**Abb. 5.22:** Erzeugter Potentialverlauf



**Abb. 5.23:** Konzept 2: Dickenvariation der Querelektrode



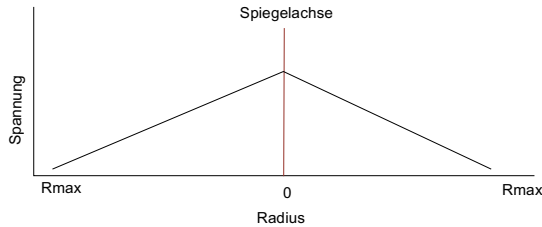
**Abb. 5.24:** Erzeugter Potentialverlauf

Für das Design des sphärischen Kompensationselementes war eine lineare Änderung des Potentials an den Hauptelektroden erwünscht. Zu diesem Zweck wählten wir eine äquidistante Anordnung der Abgriffsstellen. Hierdurch entsteht ein kegelförmiger Potentialverlauf über den Ringelektroden, wie er in Abb. 5.25 dargestellt ist.

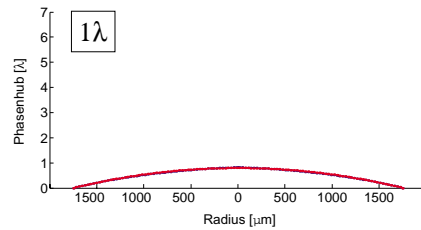
### 5.3.3 Simulationen

Zur Überprüfung der Sphärizität des über der Elektrodenfläche erzeugten Phasenprofils wurden Simulationen durchgeführt. Hierzu wurde der für eine Brennweite  $F$  benötigte maximale Phasenhub  $\phi_{max}$  mit Gl. 5.3 bestimmt und anschließend die durch eine Messung am FK-Element gewonnene Phasenhub-Spannungs-Charakteristik nach einem Ausschnitt bestmöglicher Sphärizität bei gleichem Phasenhub  $\phi_{max}$  abgesucht. Der so gefundene PSC-Abschnitt lieferte neben der Abweichung vom Idealprofil die benötigten Spannungen an den Ringelektroden. Unter Berücksichtigung der sich durch Zuleitungen ergebenden Potentialabfälle konnten so zusätzlich die Ansteuerspannungen am FK-Element ermittelt werden.

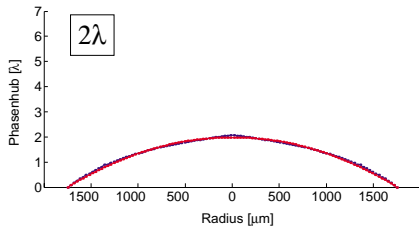
Die in Abb. 5.26 - 5.28 dargestellten Phasenverläufe zeigen die im Vergleich zum Idealprofil (gestrichelte Linie) realisierbaren Phasenprofile (durchgezogene Linie). Der Gesamtphasenhub bei den Simulationen betrug  $7\lambda$ .



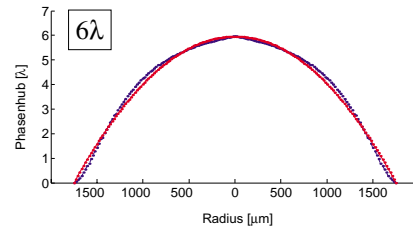
**Abb. 5.25:** Sich ergebender Potentialverlauf bei äquidistanten Abgriffsstellen



**Abb. 5.26:** Simulation des Phasenverlaufs unter Verwendung von  $\phi_{max}=1\lambda$



**Abb. 5.27:** Simulation des Phasenverlaufs unter Verwendung von  $\phi_{max}=2\lambda$



**Abb. 5.28:** Simulation des Phasenverlaufs unter Verwendung von  $\phi_{max}=6\lambda$

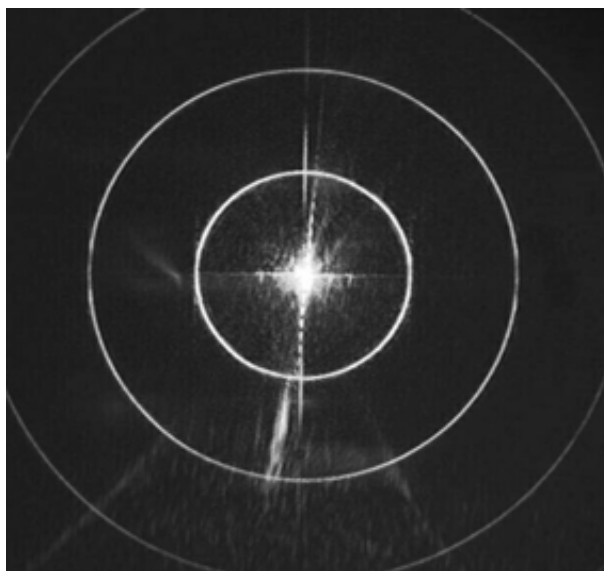
Es ist zu erkennen, dass eine sehr gute Annäherung an das sphärische Idealprofil, beginnend bei kleinen Phasenhüben bis fast zum maximalen Phasenhub der Zelle, möglich ist. Es zeigte sich jedoch, dass sich bei vorhandenem Elektrodenlayout nur konkave Brechungsindexprofile und damit nur negative Brennweiten realisieren lassen. Da für die Korrektur der im Laufwerk auftretenden Aberrationen ein konvexes Brechungsindexprofil benötigt wird, wurden verschiedene Ansätze verfolgt. Eine Möglichkeit, ein konvexes Brechungsindexprofil zu erzeugen, besteht in der Verwendung homeotrop orientierter FK-Zellen und



Ausnutzung der daraus resultierenden inversen PSC. Arbeiten zu diesen Zelltypen werden bei Somalingam [59] im Detail beschrieben. Ein weiterer Ansatz ist die Umkehr der Brennweite durch das Verkleben des FK-Elementes mit einer konvexen Linse der Brennweite  $F_{Linse} = -F_{FKLinse}(U=0)$ . Im späteren Laufwerkseinsatz zeigte sich, dass eine Umkehr der Brennweite auch durch Verschieben der Kollimatorlinse erreicht werden kann.

### 5.3.4 Beugung am Phasenprofil

Aufgrund der ebenen Phasenplateaus über den Elektrodenringen kommt es zu Beugungerscheinungen. Die Intensität im Brennpunkt ist hierbei von der zu realisierenden Brennweite abhängig, da bei kürzeren Brennweiten die Phasendifferenz zwischen benachbarten Elektrodenringen vor allem am Rand hin zunimmt. Der lokale Phasenhub über einem Ring lässt sich nach Gl. 5.3 mit  $r = r_{Ring}$  berechnen. Für eine Brennweite  $F=400$  mm ergibt sich so für Element 2 zwischen den äußeren Ringen ein Phasensprung von  $\phi(\text{Ring } 33) - \phi(\text{Ring } 32)$  von  $1.88 \lambda$ . Durch das diskretisierte Phasenprofil und die großen Phasensprünge am Rand entsteht Beugung, die wie in Abb. 5.29 dargestellt, die optische Performance des Elementes reduziert. Die gemessene Intensität im Fokus betrug 59 %. Um diese zu weiter zu reduzieren, ist eine noch bessere Anpassung des Elektrodenlayouts, vor allem der äußeren Ringe, notwendig, was jedoch aufgrund der limitierten Fertigungstoleranzen nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen ist.



**Abb. 5.29:** Optische Antwort von Element 1 (mit Zusatzlinse) bei einer Brennweite des FK-Elementes von  $F=400$  mm

### 5.3.5 Vermessen der Wellenfront

Zur schnellen Bestimmung der erzeugten Wellenfrontform kam die in Abschn. 2.3.4 vorgestellte Polarisationsmethode unter Verwendung von Weißlicht zum Einsatz. Hierfür wurde das FK-Element unter gekreuzten Polarisatoren mit Weißlicht durchleuchtet und die erhaltene Farbmodulation (siehe Abb. 5.30) analysiert. Hierbei galt zu prüfen, ob:

- Fehlstellen im Elektrodenlayout oder der Orientierungsschicht vorliegen: Aufgrund der vielen Entwicklungsschritte (Laserlithographie, Photolithographie, nasschemisches Ätzen und Entwickeln) kommt es immer wieder zu Fehlstellen im Elektrodenlayout. Liegen diese in wichtigen Bereichen wie z.B. in den dünnen Zuführelektroden, so kann die Funktion des Elementes eingeschränkt bzw. das Element gänzlich unbrauchbar werden.
- Keilfehler vorliegen: Beim Bau von Prototypen ist die Realisierung von planparallelen Zellen auf sub- $\mu\text{m}$  Genauigkeit fast nicht möglich. Ursachen hierfür sind die zum Bau verwendeten Glasplatten (1 mm) mit Welligkeiten im  $\mu\text{m}$ -Bereich und die beim Verkleben der Glasteile induzierte Verspannung der Platten zueinander. Die so entstehende Dickenschwankung in der Zelle verändert das Phasenprofil und macht bei zu großen Dickenfehlern eine sinnvolle Ansteuerung unmöglich.
- ein korrekter Spannungsabfall erzeugt wird: Der Spannungsabfall entlang der Elektrodenflächen ist nicht immer vorauszusehen. So kann es vorkommen, dass das Potential über den Hauptelektroden variiert, was zu einer Verschlechterung des Phasenprofils führt. Werden solche Effekte entdeckt, muss das Design neu überdacht werden.

Zur Absolutmessung der Wellenfront kam ein Shack-Hartmann-Sensor der Fa. Optocraft mit der Analysesoftware SHSLab 9.01, die am Lehrstuhl für Optik der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelt wurde, zum Einsatz. Das Arbeitsprinzip dieses Sensors ist in Abb. 5.31 dargestellt.

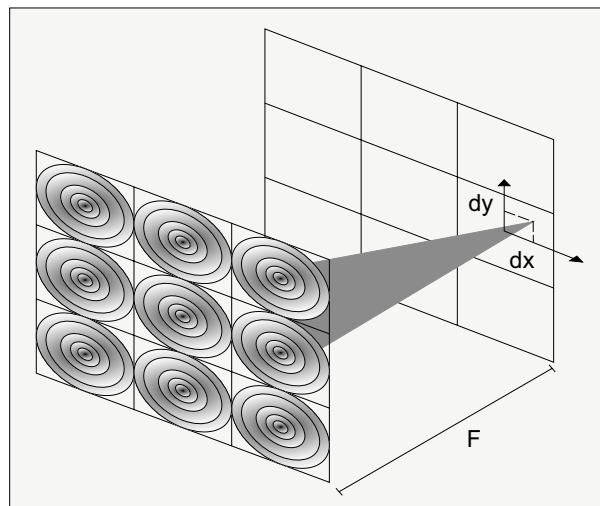
Die durch das FK-Element erzeugte Wellenfront wird durch ein Mikro-Linsenarray in eine Matrix von Subwellenfronten aufgeteilt und auf einen CCD-Chip fokussiert. Anhand der Lage der Brennpunkte lässt sich die primäre Wellenfront rekonstruieren. Abb. 5.32 zeigt die ermittelte Wellenfront eines 12  $\mu\text{m}$  dicken Kompensationselementes unter Verwendung eines Phasenhubs von 5.96  $\lambda$ . Die Zelle wurde hierfür mit einer ebenen Wellenfront der Wellenlänge 0.405  $\mu\text{m}$  beleuchtet. Die Ansteuerspannungen betrugen  $U_1=29\text{ V}$ ,  $U_2=0\text{ V}$  und  $U_G=28.8\text{ V}$ .

## 5.4 Verbesserte CLC-Linse als Kompensationselement

Das realisierte Kompensationselement erlaubt die Erzeugung sphärischer Phasenprofile, zeigt jedoch von der Brennweite abhängige Beugungsverluste, die den Wirkungsgrad des

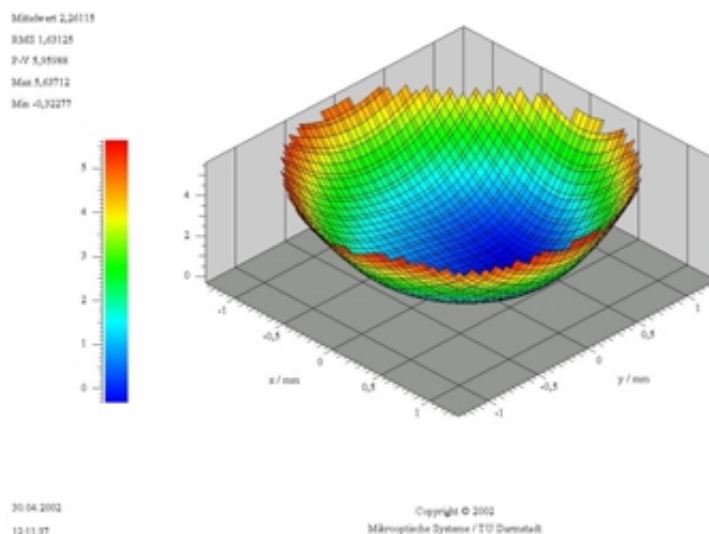


**Abb. 5.30:** Sphärisches Kompensationselement unter gekreuzten Polarisatoren



**Abb. 5.31:** Funktionsprinzip eines Shack-Hartmann-Sensors

Elementes reduzieren. Eine Alternative zum sphärischen Kompensationselement stellt die bereits in Abschn. 4.3 vorgestellte CLC-Linse dar, die aufgrund ihrer homogenen Elektrodenflächen frei von Beugungsverlusten ist. Ihre Schaltzeiten von 5 Sekunden sowie die geringe Transmission von ca. 60 % waren jedoch für den Einsatz in einem DVD-Laufwerk noch nicht ausreichend. Durch Untersuchungen des Schichtsystems der FK-Zelle und Anpassen der Fertigungstechnologien konnte eine wesentliche Verbesserung der Transmission auf bis zu 85 % und durch den Einsatz sehr hoch doppelbrechender FKe eine Reduktion der Schaltzeit um den Faktor 5 auf 1 Sekunde erreicht werden. Die hierzu angestellten



**Abb. 5.32:** Aufgenommene Wellenfront eines sphärischen Kompensationselementes.

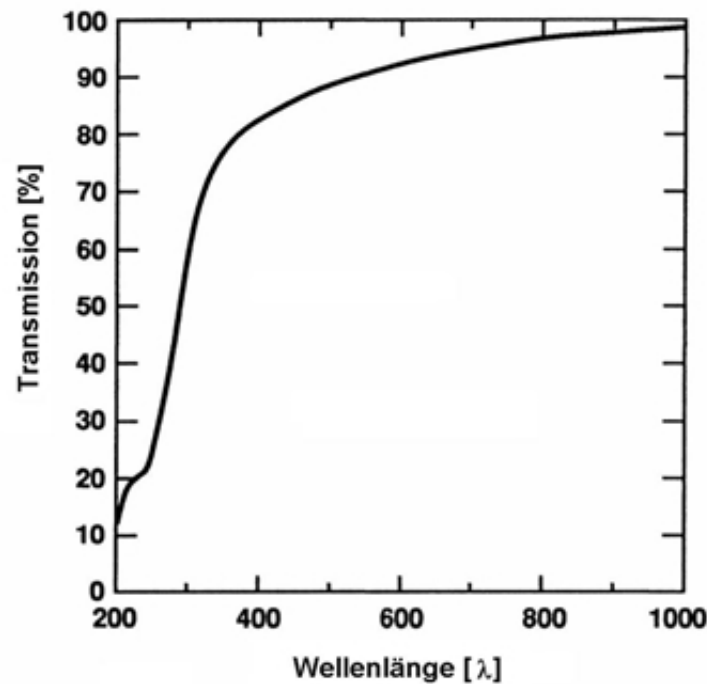
Untersuchungen sind Gegenstand des folgenden Abschnitts.

### 5.4.1 Optimieren der Transmission

Die Transmissionsverluste in einer CLC-Linse entstehen durch Reflexion und Absorption in dem bestehenden Mehrschichtsystem aus Glas, ITO, Polyimid und FK. Zur Untersuchung des Schichtsystems wurde die FK-Zelle mittels der Simulationssoftware *Filmstar Design* der Fa. FTG nachgebildet und das Verhalten der dünnen Schichten simuliert. Es stellte sich heraus, dass für den bei BluRay-Laufwerken interessanten Wellenlängenbereich von 400-410 nm die leitfähige Elektrodenschicht aus ITO der wesentliche Verursacher des Transmissionseinbruches war. ITO besitzt im Vergleich zu den anderen Schichtmaterialien einen nicht vernachlässigbaren Absorptionskoeffizienten bei Wellenlängen unterhalb von 450 nm (siehe Abb. 5.33).

Aufgrund des hohen Brechungsindex der ITO-Schicht ( $n_{ITO} \simeq 2.1 - 2.3$ ) kommt es an seinen Grenzschichten zu Polyimid ( $n_{Polyimid} \simeq 1.5$ ) und Glas ( $n_{Glas} \simeq 1.5$ ) zu einer stark wellenlängenabhängigen Reflexion. Das simulierte Schichtsystem ist in Abb. 5.34, das daraus resultierende Transmissionsspektrum für eine  $x=3$  nm und eine  $x=20$  nm dicke ITO-Schicht in Abb. 5.35 gezeigt.

Die in der Simulation auftretende Intensitätsmodulation kann durch den Fabry-Perot-Effekt erklärt werden, der bereits zur Messung der Zelldicke in Abschn. 2.3.3 betrachtet wurde. Es zeigte sich, dass eine Verbesserung der Transmission durch eine Reduktion der Schichtdicke erreicht werden kann. Zur Herstellung dünner, homogener ITO-Schichten wurde der im Hause verfügbare Elektrodenstrahlverdampfer mit einer sich drehenden Aufnah-

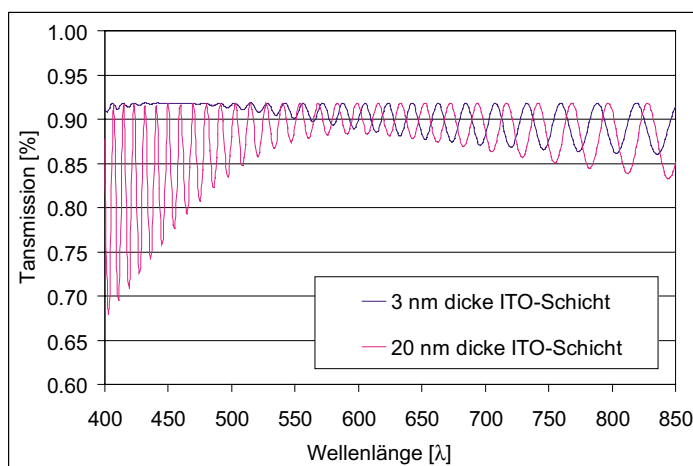


**Abb. 5.33:** Transmissionsspektrum einer 40 nm dicken ITO-Schicht



**Abb. 5.34:** Das zur Simulation der Transmission verwendete Schichtsystem

meplatte ausgestattet und verschiedene Aufdampftraten und Sputtermaterialien getestet. Die besten Resultate konnten mit  $In_2O_3/SnO_2$ -Tabletten (*Substanz-A*) der Fa. Merck bei einer Aufdampftrate 0.1-0.3 nm/Sek. unter einem Vakuumdruck von  $10^{-8}$  bar erzielt werden. Zum Schutz vor Kontamination und zum Entfernen restlicher Staubpartikel wurde die zu beschichtende Seite des Substrats mit einem Kolodiumfilm versiegelt und der Film kurz vor dem Aufdampfprozess in der Vakuumkammer wieder entfernt. Nach dem Aufdampfen wurde das beschichtete Substrat für 30 Minuten bei 400 °C auf einer Heizplatte



**Abb. 5.35:** Transmissionsspektrum einer FK-Zelle mit variabler ITO-Schichtdicke

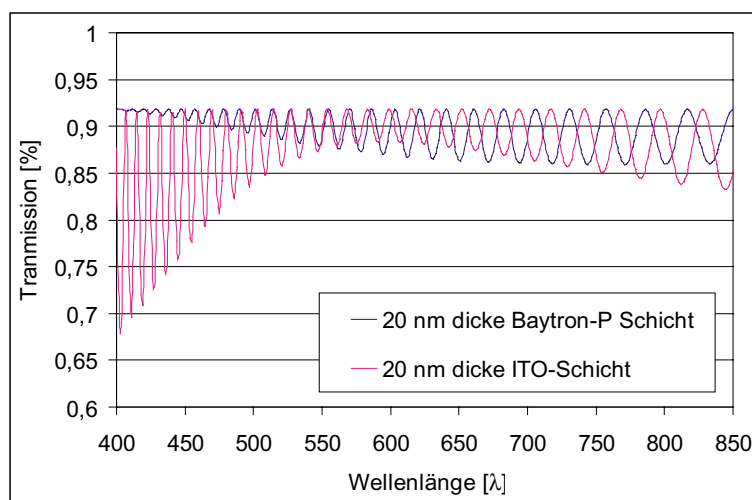
bei Sauerstoffzufuhr durchoxidiert. Durch die eingeführten Maßnahmen konnten homogene ITO-Schichten mit einer Dicke unterhalb 3 nm und einer Leitfähigkeit zwischen 4-10 KOhm/sq hergestellt werden. Um die Transmission weiter zu senken, wurden zusätzlich Antireflexschichten aus Magnesiumfluorid auf die Substratoberseiten aufgedampft, was einen weiteren Gewinn von 4 % erbrachte. Die Gesamttransmission konnte so für eine Wellenlänge von 405 nm um 20 % von anfänglich 65 % auf bis zu 85 % gesteigert werden.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Transmissionsverluste bestand im Austausch der ITO-Schicht durch eine leitfähige Schicht mit kleinerem Brechungsindex. Hierzu wurde das leitfähige Polymer Baytron-P der Fa. Bayer untersucht.

Abb. 5.36 zeigt die sich aus der Simulation ergebende Verbesserung in der Transmission durch Austausch einer 20 nm dicken ITO-Schicht ( $n=2.3$ ) durch eine leitfähige Polymerschicht ( $n=1.5$ ) gleicher Dicke. Bei der Herstellung von leitfähigen Polymerschichten waren eine Reihe von Experimenten notwendig, um die notwendige Haftung des Films auf den Substraten sicherzustellen. Des weiteren konnte durch Reiben des getrockneten Polymerfilms auf den Einsatz von Orientierungsschichten verzichtet werden. Die gemessene Transmission bei  $\lambda=405$  nm belief sich nach Optimieren der Schichten auf 80 %. Der Umgang mit leitfähigen Polymeren wird in der Arbeit von Somalingam [59] im Detail beschrieben.

### 5.4.2 Optimieren der Schaltzeiten

Wie in Abschn. 2.3.5 gezeigt, sind die Schaltzeiten nematischer FKs von der Fließ- und Rotationsviskosität, den elastischen Konstanten und von der Polarisierbarkeit des FK-Materials abhängig. In der Anwendung, in der ein definierter Phasenhub realisiert werden muss, hängt die Schaltzeit indirekt zusätzlich von der Zelldicke und der Größe der

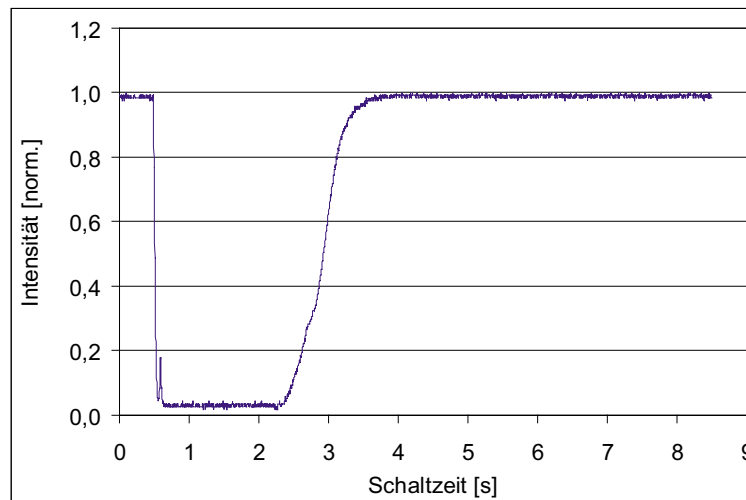


**Abb. 5.36:** Transmissionsspektrum einer FK-Zelle unter Verwendung einer 20 nm dicken Leitschicht mit  $n=2.3$  (durchgezogen) sowie mit  $n=1.5$  (gestrichelt).

Materialdoppelbrechung ab. Zum Optimieren der Schaltzeiten wurden in Abschn. 2.3.6 verschiedene Effekte zur Schaltzeitenreduktion vorgestellt, die jedoch zu Beginn dieser Arbeiten noch nicht zur Verfügung standen. So wurde versucht, Materialien mit möglichst hoher Doppelbrechung und geringer Rotationsviskosität einzusetzen. Zum Optimieren der Schaltzeiten und der Schaltcharakteristik kam daher ein neuer, sehr hoch doppelbrechender FK (BL006) der Fa. Merck mit einer Doppelbrechung von  $\Delta n = 0.39$  ( $\lambda=0.405$  nm), zur Anwendung. Im Vergleich zu vorher verwendeten Materialien konnte so die Zelldicke der FK-Linse nahezu halbiert und das Schaltverhalten durch die stärker wirkenden Randanbindungen verbessert werden. Mit dem Einsatz von noch dünneren Spacern ( $3.5 \mu\text{m}$ ) wurde so eine Schaltzeitenreduktion von 2.85 auf unter 1 Sekunde erreicht. Abb. 5.37 zeigt die gemessene Schaltcharakteristik einer optimierten CLC-Linse beim Durchschalten des vollen Brennweitenbereichs. Frühere Ausreißer im Schaltverhalten (siehe Abb. 4.12 beim Schalten  $F_2 \rightarrow F_3$ ), sog. Blur-Out-Effekte, die durch die schwache Randanbindung entstanden, wurden durch Verringerung der Zelldicke sowie eine bessere Orientierung der Polyimidschichten beim Reibeprozess unterbunden.

## 5.5 Kompensationselement zur Korrektur von Koma

Wie in Kap. 5 gezeigt, lassen sich die bei Verkippen einer Disk auftretenden Koma-Aberrationen durch Einführen einer Korrekturphase (Abb. 5.16) vor der Objektivlinse kompensieren. Zu diesem Zweck wurde ein FK-Element entwickelt, das unter Verwendung möglichst weniger Ansteuerelektroden die gewünschte Phasenfront generiert. Um Beugungsverluste sowohl am Phasen- wie auch am Elektrodenprofil zu minimieren, wurde



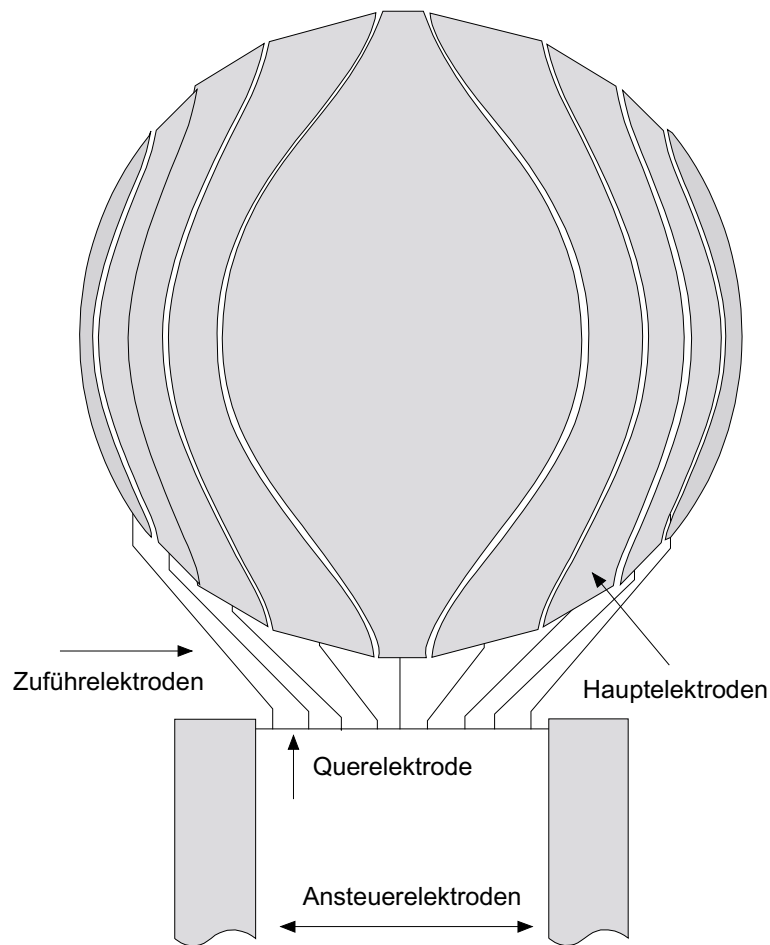
**Abb. 5.37:** Schaltverhalten der verbesserten CLC-Linse beim Durchlaufen des gesamten Fokusbereiches von  $F=360\text{ mm} \rightarrow F=\infty$ .

unter Verwendung von *Meshing*-Techniken ein Design gewählt, bei dem Ansteuerelektroden außerhalb der aktiven Zone platziert werden konnten. Das zur Erzeugung einer solchen Kompensationsphase hergestellte FK-Element, dessen Elektrodenlayout und das Vermessen der durch das Element erzeugten Wellenfront sind Gegenstand dieses Abschnitts.

### 5.5.1 Elektrodenesign

Zur Herstellung eines geeigneten Elektrodenlayouts sind eine Reihe von Faktoren zu berücksichtigen. Das Element musste, da es in einem Massenprodukt zum Einsatz kommen sollte, kostengünstig und einfach herzustellen sein. Neben einer möglichst guten Anpassung an das sich dynamisch ändernde Korrekturprofil bei Kippwinkeln bis zu  $0.6^\circ$  der Disk waren eine hohe Transmission, eine einfache Ansteuerung sowie eine geringe Leistungsaufnahme des Elementes gefragt. Zur Entwicklung eines ersten Elektrodenlayouts wurde das aus den Simulationen in Abschn. 5.2.2 erhaltene Korrekturprofil (Abb. 5.16) quantisiert und als Vorlage zum Design der aktiven Zone herangezogen. Da die zu erzeugende Phasenfront nur einen Phasenhub von  $1-2\lambda$  benötigt, konnten großflächige und damit wenig beugende Elektrodenflächen realisiert werden. Zur Ansteuerung der Hauptelektrodenflächen wurde das bereits in Abschn. 5.3.2 vorgestellte *Conductive-Ladder-Meshing* Verfahren eingesetzt. Da alle Hauptelektrodenflächen frei zugänglich sind, wurde die Querelektrode außerhalb der aktiven Zone platziert und das über diese abfallende Potential mittels Zuführelektroden an die Flächenelektroden herangeführt. Für eine hohe Transmission und zur Realisierung einer geringen Leistungsaufnahme wurden hochohmige ITO-Schichten eingesetzt. Abb. 5.38 zeigt das mittels *AutoCad* realisierte Elektrodenesign.





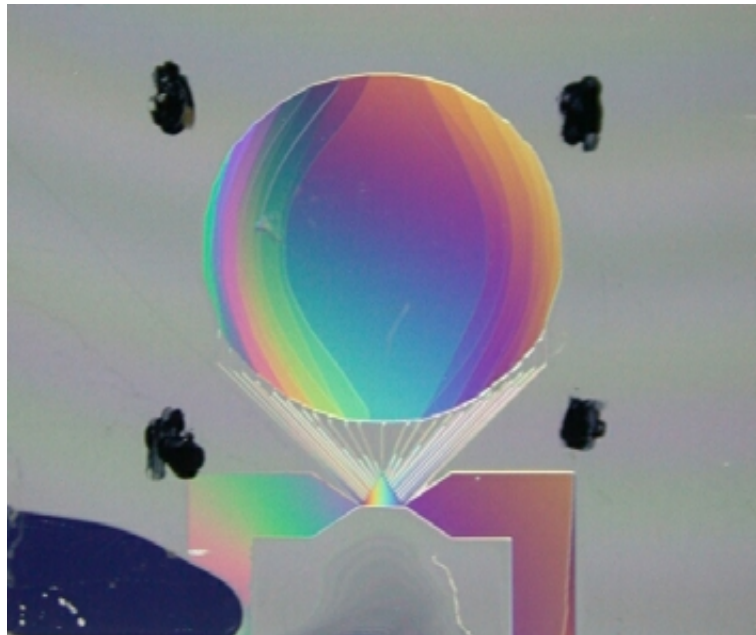
**Abb. 5.38:** Aus den Simulationsergebnissen erhaltenes Elektrodendesign.

### 5.5.2 Vermessen der Wellenfront

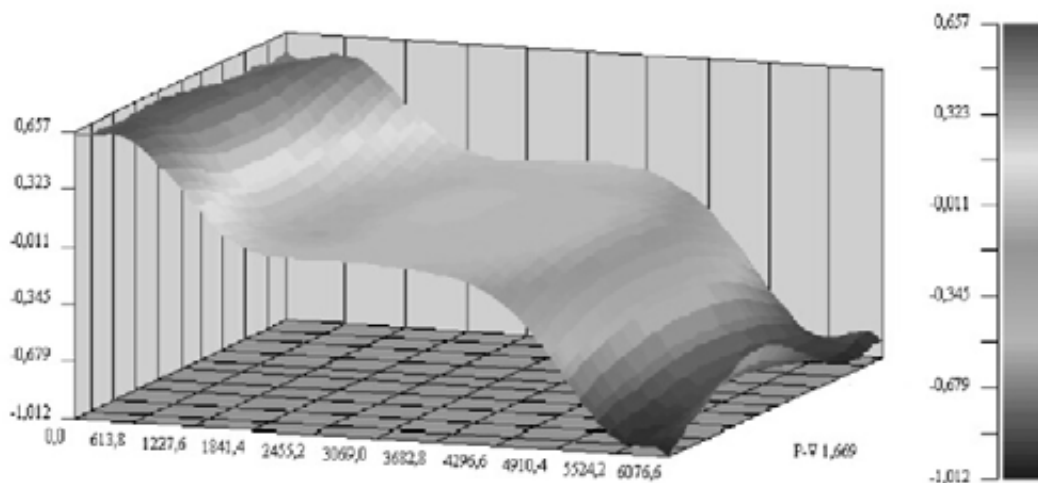
Zur Charakterisierung der Wellenfront kamen die in Abschn. 5.3.5 vorgestellten Messmethoden zum Einsatz. Die Polarisationsmethode wurde auch hier zur Überprüfung der Funktion, zur Fehlererkennung im Elektrodenlayout und zur Festsetzung geeigneter Ansteuerungen eingesetzt. Abb. 5.39 zeigt ein zwischen gekreuzten Polarisatoren eingeschaltetes Kompensationselement. Neben dem erkennbaren koma-förmigen Verlauf ist ein leichter vertikaler Farbverlauf zu erkennen, der durch leicht schräg zueinander verklebte Glasplatten im  $\mu\text{m}$ -Bereich entsteht und beim Bau von Prototypen oft nicht zu vermeiden ist.

Um eine Aussage über den absoluten Phasenverlauf zu erhalten, wurde die Zelle mittels eines Shack-Hartmann-Sensors bei einer Wellenlänge von 633 nm vermessen. Die gemessene Wellenfront ist in Abb. 5.40 dargestellt.

Wie auch im Polarisationsbild ist der eindeutige Verlauf einer koma-förmigen Wellenfront zu erkennen. Unter Verwendung des linearen PSC-Spannungsbereichs konnte mit einer 12



**Abb. 5.39:** FK-Zelle zur Korrektur von Koma unter gekreuzten Polarisatoren



**Abb. 5.40:** Gemessene Wellenfront des Koma-Kompensationselementes unter Verwendung des linearen PSC-Spannungsbereiches

$\mu\text{m}$  dicken Zelle ein maximaler Phasenhub von  $1,67 \lambda$  erzeugt werden, der zur Korrektur der Wellenfront einer um  $0,6^\circ$  verkippten Disk mehr als ausreichend ist.

Das in Abb 5.38 vorgestellte Elektrodenlayout stellt eine Basisgeometrie für zukünftige

Korrekturelemente dar. Neben einer freien Wahl der Flächengeometrie in der aktiven Zone können durch Implementierung mehrerer Querelektroden mit linearem sowie nicht-linearem Spannungsabfall (siehe Abschn. 5.3.2) eine Vielzahl von Profil- und Ansteuermöglichkeiten realisiert werden. Das hergestellte Kompensationselement zur Korrektur von Koma konnte während des Projektes nicht in einem optischen Laufwerk getestet werden, da es zu einer Änderung der Forschungsschwerpunkte im Projekt kam. Die Substratdicke der in der Entwicklung steckenden BluRay-DVD wurde durch das DVD-Konsortium von 0.6 mm auf 0.1 mm reduziert, um Koma-Aberrationen nicht mehr aktiv kompensieren zu müssen [63]. Die höhere Empfindlichkeit der Disks gegenüber Kratzern wurde hierbei als ein geringeres Problem eingeschätzt. Die vorgestellten Elemente können durch Modifikation der Elektrodenstruktur in einer Reihe optischer Systeme eingesetzt werden. Die vorgeschlagenen Erweiterungen im Elektrodenlayout und die im Zusammenhang mit dem BluRay-Laufwerk entwickelten sphärischen und komaförmigen Kompensationselemente überzeugten durch ihre besondere Ansteuerung und das Konzept durch seine Neuartigkeit im Laufwerksdesign. Beide Elemente wurden daher unter [62] für ein weltweites Patent angemeldet.

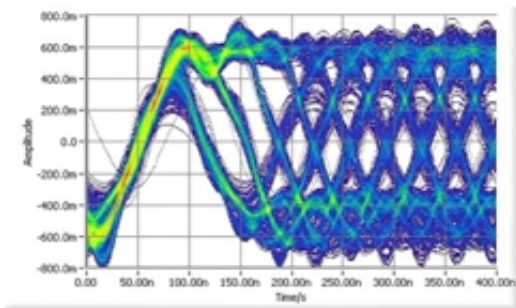
## 5.6 Vermessung der Kompensationselemente in einem Testlaufwerk

Nach Fertigstellung und Charakterisierung der Einzelkomponenten wurden das sphärische Kompensationselement sowie die verbesserte CLC-Linse bei der Deutschen Thomson Brandt in einem BluRay-Testlaufwerk vermessen. Es konnte gezeigt werden, dass beide Elemente eine Korrektur der sphärischen Aberrationen im System bewirken und somit ein Auslesen beider Datenschichten ermöglichen. Neben mechanischen Alternativen, wie dem Einklappen einer Linse fester Brennweite oder dem Verschieben von Linsen in einer Teleskopoptik, wurden die entwickelten Kompensationselemente untersucht.

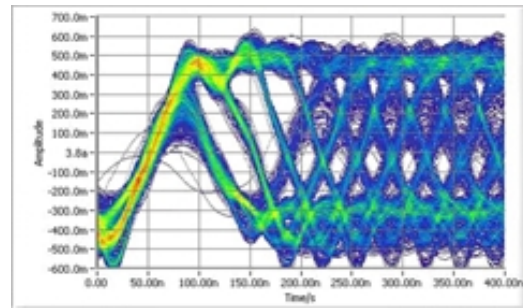
Hierzu wurden diese zwischen Kollimator und Objektivlinse des Testlaufwerks justiert und das Eyepattern sowie der Jitterwert [64] des Systems im laufenden Betrieb, d.h. bei rotierender Disk sowie geschlossenen Fokus- und Tracking-Regelkreisen, gemessen. Das Eyepattern spiegelt die Gesamtpformance des Systems wider und zeigt, wie gut beim Lesen einer Disk die einzelnen Pits unterschiedlicher Länge voneinander getrennt werden können. Das Messen eines Eyepatterns setzt Wellenfrontfehler des Gesamtsystems von kleiner  $\lambda/30$  (RMS) und damit eine gute Wellenfront aller Einzelkomponenten voraus, um die feinen Strukturen der Disk (Spurbreiten von  $0.32 \mu\text{m}$ , Pit-Längen  $0.149 \mu\text{m}$  (2T)) auslesen zu können. Steigende Wellenfrontfehler im System führen zu einer Vergrößerung/Deformation des Fokusspots, was sich in einer Unschärfe des Eyepatterns niederschlägt.

Als erstes wurde das sphärische Kompensationselement vermessen. Zum Erzeugen eines konvexen Phasenprofils wurde dieses, wie in Abschn. 5.3.3 erläutert, zusammen mit einer Zusatzlinse ( $F=400 \text{ mm}$ ) im Strahlengang justiert. Bleibt das FK-Element ausgeschaltet, so wirkt allein die Zusatzlinse und fokussiert zusammen mit der Objektivlinse das Licht auf

die vordere Datenschicht. Das erzeugte Eyepattern beim Lesen der vorderen Datenschicht ist in Abb. 5.41 zu sehen. Die diamantförmig wirkenden Wabenstrukturen sind im Zentrum des Eyepattern gut zu erkennen, was messtechnisch einem niedrigen Jitterwert entspricht. So wurde in dieser Systemanordnung ein Jitterwert von 7.2 % unter Verwendung eines Limited Equalizers und von 11.2 % unter Verwendung eines gewöhnlichen Equalizers erreicht. Zur Fokussierung auf die hintere Datenschicht wird im FK-Element ein konkaves Phasenprofil erzeugt, das das Phasenprofil der Zusatzlinse neutralisiert. Die Treiberspannungen am FK-Element betrugen hierbei  $U_{PP_1} = 1.33 \text{ V}$ ,  $U_{PP_2} = 7.79 \text{ V}$ ,  $U_{PP_G} = 0 \text{ V}$  bei einer sinusförmigen Wechselspannung von 1 kHz. Das erzeugte Eyepattern ist in Abb. 5.42 dargestellt. Der erreichte Jitterwert unter Verwendung eines Limited Equalizers lag bei 9 %.



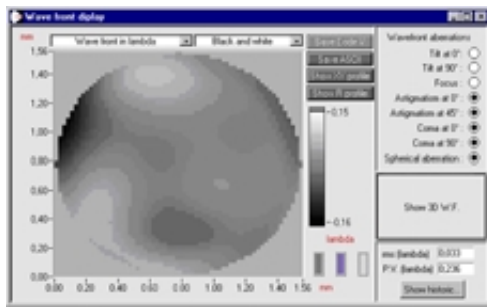
**Abb. 5.41:** Eyepattern beim Lesen der vorderen Datenschicht ohne eingeschaltetes sphärisches Kompensationselement



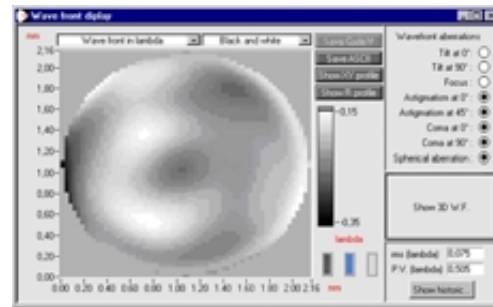
**Abb. 5.42:** Eyepattern beim Lesen der hinteren Datenschicht mit eingeschaltetem sphärischen Kompensationselement

Zur Messung der auf die Objektivlinse auftreffenden Wellenfront wurde die Objektivlinse im Aufbau durch einen Shack-Hartmann-Sensor ausgetauscht. Die Abbildungen 5.43 und 5.44 zeigen die gemessenen Wellenfrontfehler bei aus- bzw. eingeschaltetem Kompensationselement nach Abzug von Defokus- (sphärischen) und Tilt- (koma) Termen. Die Wellenfrontfehler werden im wesentlichen durch das Kompensationselement verursacht und betragen bei ausgeschaltetem FK-Element  $0.033 \lambda$  (RMS), bei eingeschaltetem FK-Element  $0.075 \lambda$  (RMS). Die entstehenden Wellenfrontfehler sind im Rahmen der erlaubten Toleranzen und lassen sich auf fertigungsbedingte Ursachen beim Verkleben der FK-Zelle zurückführen. Hierbei kommt es während des Aushärtens des UV-Kits zu Spannungen in der Zelle, wodurch es zu lokalen Zelldickenschwankungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich kommen kann. Bei einer kommerziellen Herstellung ist mit geringeren Wellenfrontfehlern zu rechnen.

Als zweites kam die verbesserte CLC-Linse zum Einsatz, wobei die Zusatzlinse aufgrund des konvexen Phasenprofils der CLC-Linse entfernt wurde. Für die Fokussierung auf die vordere Datenschicht wird die Linse aus-, zum Fokussieren auf die hintere Datenschicht eingeschaltet. Die beim Auslesen einer Disk erhaltenen Eyepattern sind in den Abbildungen 5.45 und 5.46 dargestellt. Die ermittelten Jitterwerte waren bei der CLC-Linse niedriger als beim sphärischen Kompensationselement und betrugen 6.9 % auf der vorderen und 6.4 % auf der hinteren Datenschicht. Um die Qualität mit mechanischen Lösungsansätzen

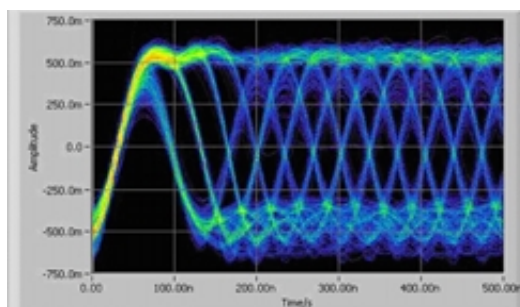


**Abb. 5.43:** Wellenfront bei ausgeschaltetem Kompensationselement

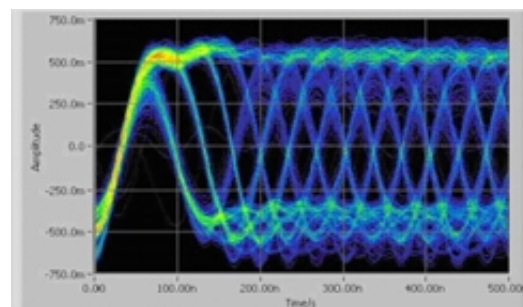


**Abb. 5.44:** Wellenfront bei eingeschaltetem Kompensationselement

vergleichen zu können, wurden Messungen mit einer Teleskopoptik durchgeführt, die zur Zeit als gängige Kompensationsmethode eingesetzt wird und durch Verschieben einer Linse die notwendige Wellenfrontkorrektur erzeugt. Bei optimaler Justage des Teleskopes wurden Jitterwerte von 5.9 % auf der hinteren und 6.3 % auf der vorderen Datenschicht ermittelt, was für die sehr gute Performance der entwickelten FK-Kompensatoren, vor allem für die der verbesserten CLC-Linse spricht.



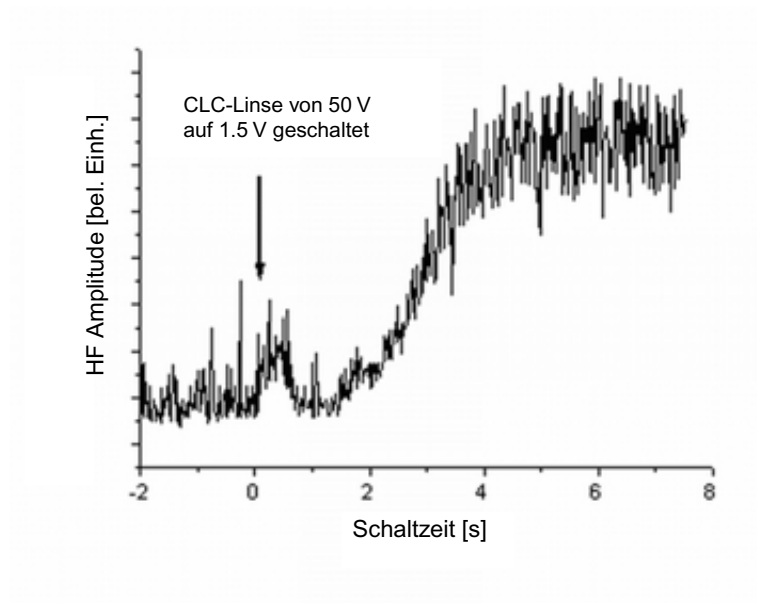
**Abb. 5.45:** Eyepattern beim Lesen der vorderen Datenschicht ohne eingeschaltete CLC-Linse



**Abb. 5.46:** Eyepattern beim Lesen der hinteren Datenschicht mit eingeschalteter CLC-Linse

Eine weitere Fragestellung betraf das Umschaltverhalten zwischen den Datenschichten. Hierbei war von Interesse, ob die Wellenfront der CLC-Linse beim Durchfahren der Brennweite ausreichend gut ist, um den Verlust des Regelsignals zu verhindern, was zu einem Abbruch der Leseaktivität und dem zeitaufwändigen erneuten Schließen der Regelkreise geführt hätte. Zur Analyse des Umschaltvorgangs wurde das modulierte Lichtsignal (HF-Signal) am Photodetektor, dessen Amplitude das Signal-Rausch-Verhältnis bestimmt, bei rotierender Disk und geschlossenem Fokus- und Tracking-Regelkreis aufgezeichnet (siehe Abb. 5.47). Hierfür wurde der Fokus der Objektivlinse von der hinteren auf die vordere Datenschicht verschoben und die eingeschaltete CLC-Linse (50 V<sub>PP</sub>) auf 1.5 V heruntergeschaltet.

Die eintretende Brennweitenänderung der CLC-Linse reduziert hierbei die Fokusgröße auf



**Abb. 5.47:** HF-Signal beim Fokussieren auf die vordere Datenschicht. Die HF-Amplitude wurde bei Änderung der CLC-Brennweite aufgezeichnet.

der vorderen Datenschicht und lässt die HF-Amplitude anwachsen. Es konnte eine kontinuierliche Brennweitenänderung ohne Verlust der Regelkreise durch die CLC-Linse erreicht werden.

## 6 Weitere adaptive FK-Elemente

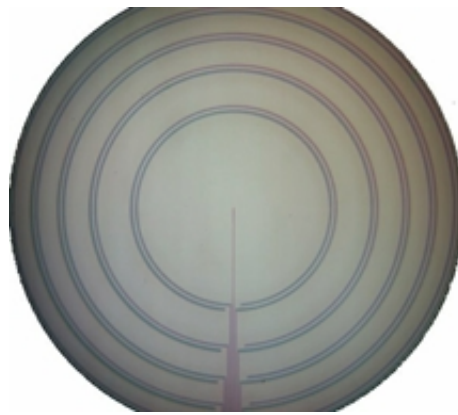
Die in dieser Arbeit bereits vorgestellten adaptiven optischen Elemente (CLC-Linse, ADLC-Linse, Korrekturalelemente) wurden für den Einsatz in optischen Laufwerken entwickelt und zeigen, dass durch ein auf die Anwendung angepasstes Elektrodenlayout und durch die richtige Wahl der Material- und Schichtsysteme adaptive Optiken mit hoher Wellenfrontgüte bei gleichzeitig minimaler Ansteuerung realisiert werden können. Für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Geschwindigkeit können die bereits in Abschn. 2.3.6 vorgestellten Techniken zur Verbesserung der Schaltzeit zum Einsatz kommen. Das Anwendungsspektrum für adaptive optische Komponenten ist sehr breit gestreut: Angefangen bei mikrooptischen Sensoren über den Einsatz in mikrooptischen Systemen für den Telekommunikationssektor (dynamische Fasereinkopplung, optische Stell- und Korrekturglieder, etc.) bis hin zu Projektionssystemen. So wurden in der Arbeitsgruppe *Mikrooptische Systeme* an einer Reihe weiterer FK-Elemente gearbeitet. Hierbei entstanden Elemente zur Strahlablenkung, Elemente zur Specklevernichtung in Laserprojektionssystemen, Multifunktionselemente (dynamische Linse mit integriertem Strahlablenker), Strahlformer (Gauß  $\rightarrow$  Doughnut) sowie eine Weiterentwicklung der bereits vorgestellten ADLC-Linse (EADLC-Linse). An Elementen zur dynamischen Fasereinkopplung wird zur Zeit gearbeitet. Details zu den Strahlablenkern sind bei [37], zur Specklevernichtung bei [65] und Details zu den Multifunktionselementen bei [66] zu finden. Im Folgenden soll auf die im Rahmen dieser Dissertation entstandenen FK-Elemente, die verbesserte ADLC-Linse und auf den entwickelten Strahlformer eingegangen werden.

### 6.1 Die verbesserte adaptive Flüssigkristalllinse (EADLC-Linse)

Wegen des geringen Wirkungsgrades und der vielen Ansteuerelektroden bei der ADLC-Linse wurde im Rahmen zweier begleiteter Diplomarbeiten [36] [18] eine verbesserte ADLC-Linse, die EADLC-Linse, entwickelt. Durch Einsatz einer zweilagigen Elektrodenstruktur zum Erzeugen von Fresnelzonen mit kontinuierlichem Phasenverlauf konnten so Beugungsverluste, wie sie bei der ADLC-Linse auftraten, minimiert und der Wirkungsgrad bei gleichzeitiger Reduktion der Ansteuerelektroden erhöht werden. Zur Realisierung kam eine neue Meshing-Technik, das so genannte Conductive *Layer* Meshing, zum Einsatz.

### 6.1.1 Elektrodendesign

Gegenüber den bisher vorgestellten einlagigen Elektrodenlayouts (ADLC-Linse, Kompensationselemente) handelt es sich bei der EADLC-Linse um ein Element mit zwei Elektroden-schichten. Die untere niederohmige Schicht aus Chrom (einige  $\Omega/sq$ ) dient der reinen Spannungsversorgung, während die hochohmige ITO-Schicht (einige  $k\Omega/sq$ ) zur Generierung glatter, d.h. kontinuierlicher Potentialverläufe in den einzelnen Zonen dient. Die Erzeugung von kontinuierlichen Potentialverläufen in einer Elektrodenfläche wird als *Conductive Layer Meshing* bezeichnet. Im Gegensatz zu dem in Abschn. 5.3.2 vorgestellten *Conductive Ladder Meshing* treten hier nur geringe Beugungsverluste auf, da die erzeugte Wellenfront über den Fresnelzonen keine Phasensprünge aufweist.



**Abb. 6.1:** Erstes Design einer zweilagigen Elektrodenstruktur. Die dunklen Zuleitungen stellen hierbei die niederohmige Chrom-, die hellen Flächen die hochohmige ITO-Schicht dar. Zwischen direkt benachbarten Chromelektroden ist keine leitfähige Schicht.

Abb. 6.1 zeigt eine Aufnahme der so realisierten zweilagigen Elektrodenstruktur. Dunkle Ringe stellen die Chromelektroden, die Flächen dazwischen die hochohmigen ITO-Flächen dar. Der Raum zwischen eng benachbarten Chromelektroden ist unbeschichtet. Durch die rotationssymmetrische Anordnung kommt es über den ITO-Flächen zu einem nicht-linearen Spannungsabfall. Um die Anzahl der Ansteuerelektroden klein zu halten, wurden folgende Rahmenparameter gewählt [36]:

- Linsendurchmesser  $d=5$  mm
- 20 Steuerelektroden  $\rightarrow$  10 Fresnelzonen
- Designwellenlänge  $\lambda=632.8$  nm
- Designbrennweite  $F=50$  cm

Die Radien der Chrom-Zuführelektroden entsprechen hierbei den Stützstellen einer geblassenen Fresnelzonenlinse bei einer Brennweite von  $F=50$  cm.



### 6.1.2 Berechnung der Leiterbahnwiderstände

Dieser Abschnitt behandelt die Abschätzung geeigneter Leiterbahnwiderstände sowie die Realisierung und Optimierung der verwendeten ITO-Schichten während des Herstellungsprozesses. Der elektrische Gesamtwiderstand einer beliebig geformten Leiterbahnschicht ergibt sich aus der Multiplikation eines Geometriefaktors  $G$  mit dem Flächenwiderstand  $R$  (Ohm/sq) des Materials. Der Geometriefaktor kann hierbei durch Unterteilung der Struktur in gleich große Quadrate ermittelt werden. Je nach Anordnung des Designs können diese Quadrate als parallel bzw. seriell geschaltete Einzelwiderstände verstanden werden. Im hier vorliegenden Fall sind die Widerstände der Chromelektroden im Ersatzschaltbild seriell, die in den ITO-Flächen parallel miteinander verschaltet. Der kleinste Gesamtwiderstand ist wegen der vielen parallel geschalteten Widerstände (Quadrate) in der äußersten Zone zu erwarten. Damit also ein wesentlicher Anteil des Potentials über die ITO-Schicht und nicht entlang dieser abfällt, muss das Widerstandsverhältnis  $\frac{R_{ITO}}{R_{Cr}}$  mindestens 1:10 betragen. Der Geometriefaktor für die äußerste Zone ergab für die Chromelektroden einen Wert von 1530 sq, für die ITO-Fläche einen Wert von 0.0057 sq. Unter Annahme eines Flächenwiderstands von Chrom von ca.  $0.1 \Omega/sq$  lässt sich berechnen, dass der Flächenwiderstand der ITO-Schicht mindestens  $300 \frac{k\Omega}{sq}$  betragen muss. Die anderen Zonen sind aufgrund ihrer Geometrie wesentlich unkritischer, da sich hier das Widerstandsverhältnis zunehmend verbessert (siehe Tab. 6.1.2).

Zone	$G_{Cr}$ [sq]	$G_{ITO}$ [sq]	$R_{Cr}$ [ $\Omega$ ]	$R_{ITO}$ [ $\Omega$ ]	$R_{ITO}/R_{Cr}$
1	249	0.3022	2.5	302200	121365
2	600	0.0479	6.0	47900	7983
3	781	0.0270	7.8	27000	3457
4	927	0.0186	9.3	18600	2006
5	1052	0.0140	10.5	14000	1331
6	1164	0.0110	11.6	11000	945
7	1265	0.0092	12.7	9200	727
8	1360	0.0076	13.6	7600	559
9	1448	0.0066	14.5	6600	456
10	1531	0.0057	153.1	1710	11

Der Potentialverlauf in einer Zone berechnet sich wie das Potential eines Zylinderkondensators mit Innenradius  $r_1$  und Außenradius  $r_2$ . Es sei  $E(r)$  die elektrische Feldstärke,  $\rho$  die Ladungsdichte,  $Q$  die Gesamtladung in einer Zone und  $r$  der Abstand vom Mittelpunkt. Dann gilt

$$\oint \vec{E} d\vec{A} = \int \rho dV = \int_0^z E(r) * 2\pi r dz = 2\pi r z * E(r) = Q \quad (6.1)$$

Dies wird nach  $E(r)$  aufgelöst und eingesetzt in:

$$U(r) = \int \vec{E}(r) d\vec{r} = \frac{Q}{2\pi z} * \int_{r_1}^r \frac{1}{r} dr = \frac{Q}{2\pi z} * \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) + const. \quad (6.2)$$

Mit

$$U(r_1) = U_1 \quad U(r_2) = U_2$$

folgt daraus für den radialen Spannungsabfall innerhalb einer Zone

$$U(r) = U_1 + (U_2 - U_1) * \frac{\ln(\frac{r}{r_1})}{\ln(\frac{r_2}{r_1})} \quad (6.3)$$

Gleichung 6.3 besitzt für  $r \rightarrow 0$  eine Singularität.

Der Spannungsabfall im Zentrum der Linse weist also eine Singularität auf. Die innerste Zone ist jedoch aufgrund der großen Fläche und der verwendeten gaußförmigen Intensität des Beleuchtungsstrahls die mit Abstand wichtigste Zone der Linse. Zur Beseitigung des logarithmischen Spannungsabfalls in der inneren Zone wurde diese durch eine auf Ladder-Meshing basierenden Elektrodenstruktur ersetzt. Die so in einem weiteren Entwicklungsschritt realisierte innere Zone ist in Abb.6.2 dargestellt.



**Abb. 6.2:** Neues Design der innersten Zone. Die in der unteren Schicht liegenden Chrom-Elektroden (Dick/Schwarz) kontaktieren die schmale ITO-Querelektrode (Potentialabfall), welche über den Ringelektroden einen rotationssymmetrischen Spannungsabfall erzeugt. Die zwischen den Ringen liegenden schwarzen Flächen sind nicht beschichtet.

Zur Herstellung der zweilagigen Elektrodenstruktur mit einer Chrom- und einer ITO-Schicht wurde das bereits in Abschn. 3.1.5 erläuterte Liftoff-Verfahren verwendet. Ein Teilausschnitt der so realisierten Elektrodenstruktur ist in Abb. 6.3 zu sehen.

### 6.1.3 Simulationen

#### Potential- und Phasenverlauf

Im Folgenden soll der theoretisch zu erwartende Potential- und Phasenverlauf betrachtet werden. Der erzeugte Potentialverlauf in der Zelle ist durch die Geometrie der Elektro-



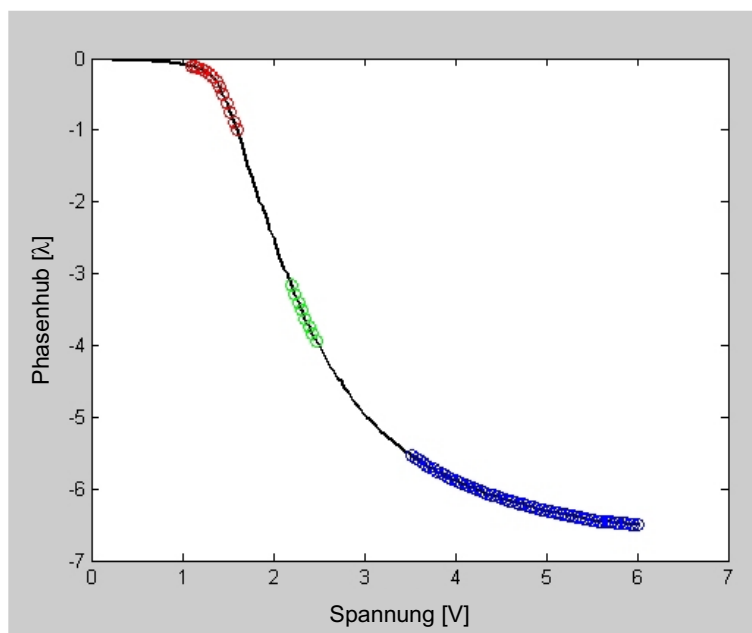
**Abb. 6.3:** Die durch das Lift-off-Verfahren hergestellte zweilagige Elektrodenstruktur. Die hell durchleuchtete Elektrode zeigt die erste Elektrodenschicht aus Chrom, die streuende graue Fläche die darüber aufgebraute hochomige ITO-Schicht. Die nicht streuende Fläche stellt die unbeschichteten Bereiche dar.

denstruktur vorgegeben und kann mit Gl. 6.3 berechnet werden. Zum Erzeugen eines fresnellförmigen Phasenprofils mit einem Phasenhub von  $\lambda$  wird mit Gl. 4.4 der Phasenhub über den Chromzuleitungen ermittelt und anschließend mit der zuvor gemessenen PSC der Zelle die Ansteuerspannungen an den Zuführelektroden bestimmt. Je nach Wahl des PSC-Arbeitsbereiches sind unterschiedliche Ansteuerspannungen und Linsenprofile denkbar. Abb. 6.4 zeigt eine bei  $\lambda=633$  nm gemessene PSC einer  $23\ \mu\text{m}$  dicken Zelle. Mögliche Arbeitsbereiche mit jeweils einem Phasenhub von  $1\ \lambda$  sind durch Ringe markiert. Unter Verwendung der Start- und Endspannungen der einzelnen Arbeitsbereiche ergeben sich unterschiedliche Potential- (Abb. 6.5) und Phasenprofile (Abb. 6.6).

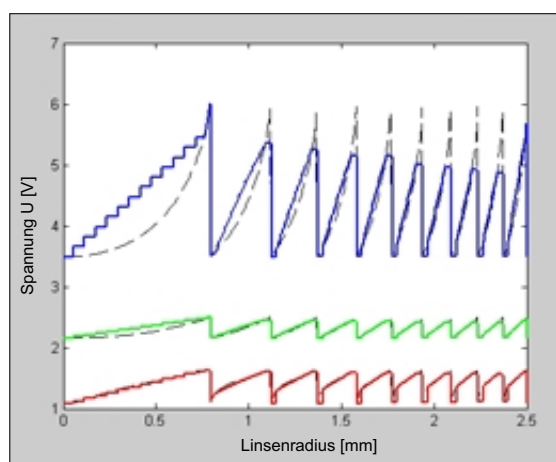
Es ist zu erkennen, dass die gewünschte Phasenverteilung besonders gut bei Verwendung kleiner Steuerspannungen zu realisieren ist. In diesem Bereich sind die Elemente jedoch langsam und reagieren, da sie in der Nähe der Schwellspannung  $U_{th}$  betrieben werden, stark auf Schwankungen im Ansteuersignal. Je nach Anforderungen ist daher, trotz nicht optimaler Phasenanpassung, der lineare sowie schnelle PSC-Arbeitsbereich zu bevorzugen.

## Optische Performance

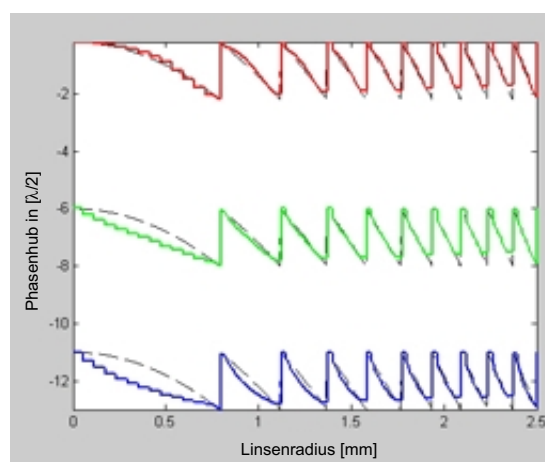
Zur Simulation der optischen Antwort hinter dem FK-Element kam die bereits in Abschn. 4.4.3 erläuterte Angular-Spektrum Methode zum Einsatz. Das eindimensionale Phasenprofil (Abb. 6.6) wurde hierfür auf zwei Dimensionen erweitert (Abb. 6.7) und mittels ASM die komplexe Wellenfunktion  $\varphi = Ie^{i\phi}$  im Abstand von  $z=50$  cm berechnet. Die dünnen Zuleitungselektroden aus Chrom wurden nicht in die Modellierung mit einbezogen. Die resultierende Intensitätsverteilung  $I$  ist in den Abbildungen 6.8 und 6.9 dargestellt.



**Abb. 6.4:** PSC einer 23  $\mu\text{m}$  dicken EADLC-Linse. Arbeitsbereiche, die jeweils einem Phasenhub von  $\lambda$  entsprechen, sind durch Kreise markiert.



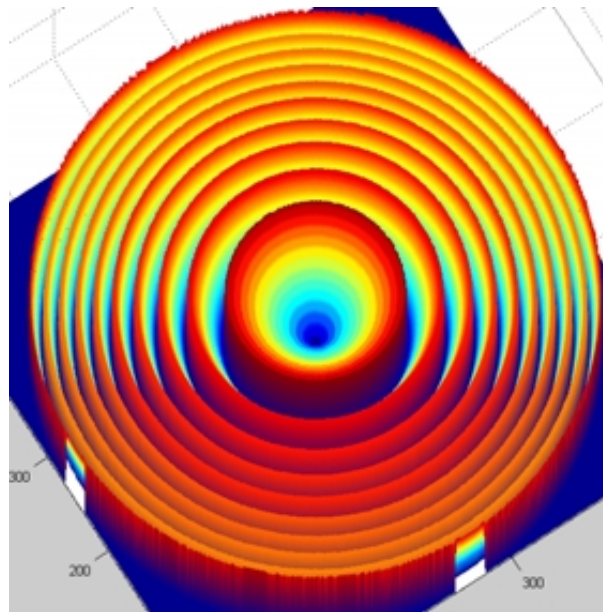
**Abb. 6.5:** Potentialprofile, die in den entsprechenden PSC-Arbeitsbereichen durch die Elektrodenstruktur erzeugt werden.



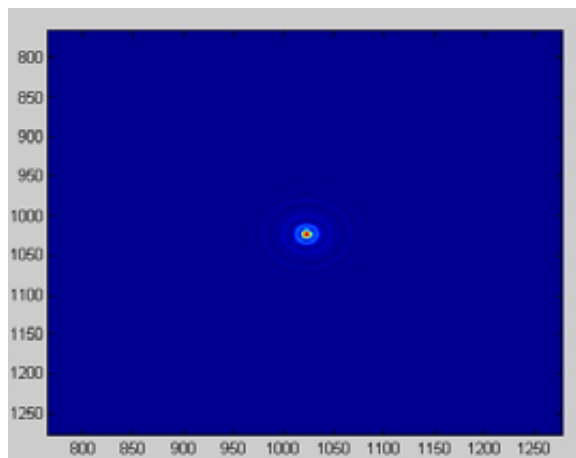
**Abb. 6.6:** Resultierende Phasenprofile (durchgezogene Linie) und optimales Phasenprofil (gestrichelte Linie). Deutlich sind die durch das Ladder-Meshing entstandenen Potentialstufen in der innersten Zone zu erkennen.

### 6.1.4 Messungen

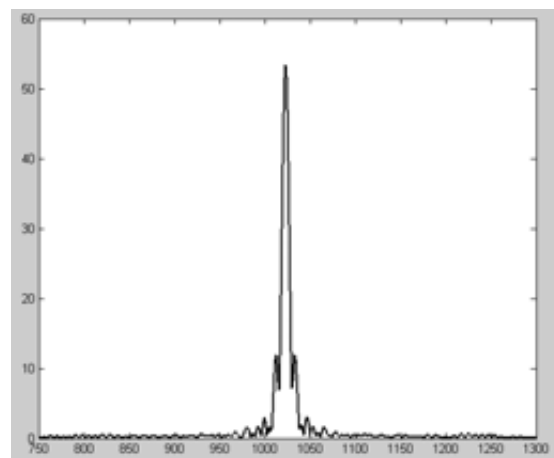
Um die Fokuseffizienz ermitteln zu können, musste zunächst ein Ansteueralgorithmus implementiert werden, der die an der Linse angelegten Spannungsprofile optimiert. Hierfür



**Abb. 6.7:** Simuliertes zweidimensionales Phasenprofil einer EADLC-Linse ohne Chromzuleitungen



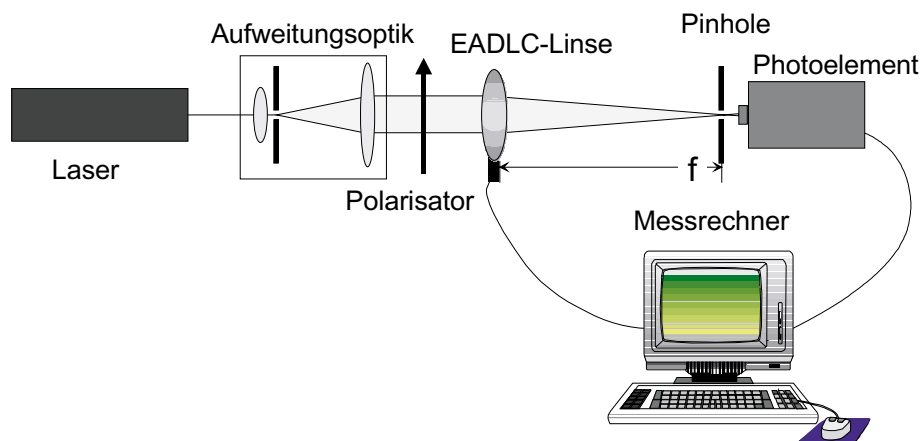
**Abb. 6.8:** Mit ASM simulierte Intensitätsverteilung bei einem Abstand von 50 cm. Die Größe des Bildfeldes ist  $400 \times 400 \mu\text{m}$



**Abb. 6.9:** Querschnitt durch den Brennpunkt

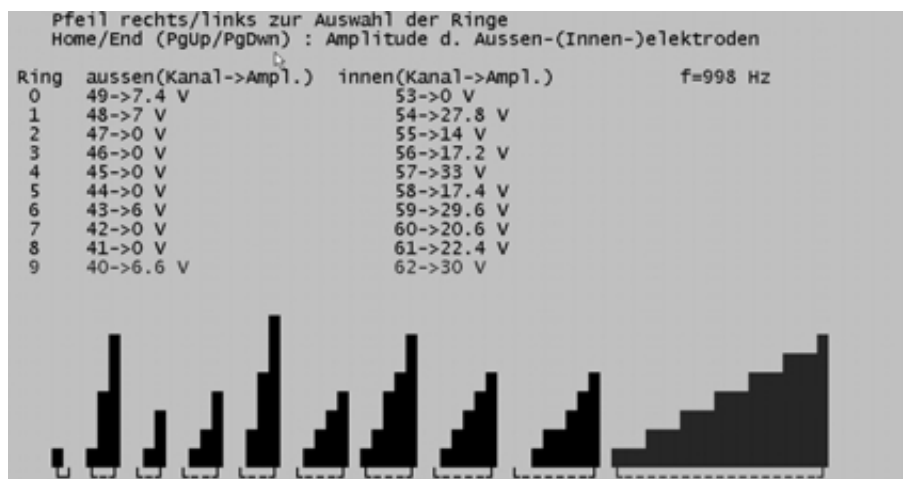
kam der in Abb. 6.10 dargestellte Versuchsaufbau zum Einsatz.

Ein aufgeweiteter Laserstrahl ( $0.633 \mu\text{m}$ ) wird durch eine EADLC-Linse auf ein Pinhole ( $r=250 \mu\text{m}$ ) fokussiert und die Intensität hinter dem Pinhole mit einem Photodetektor aufgezeichnet. Wird die Linse optimal angesteuert, ist die Intensität am Photoelement



**Abb. 6.10:** Schematischer Aufbau zur Fokusoftwareoptimierung.

maximal. Die Ansteuerung der EADLC-Linse sowie das Auslesen des Photodetektors geschehen rechnergestützt, wofür eine eigene Software zur Kontrolle und Optimierung der Ansteuerspannungen in C realisiert wurde (siehe Abb. 6.11). Für die Suche nach einem optimalen Ansteuerprofil wird ein 2-Stufen-Algorithmus verwendet, der bei Schmiedchen [18] im Detail erläutert wird.

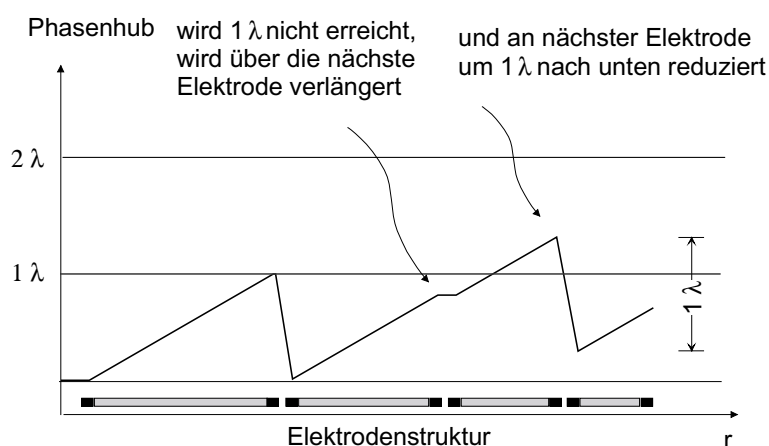


**Abb. 6.11:** Screenshot der in einer Diplomarbeit programmierten Ansteuer- und Optimierungssoftware für die realisierten EADLC-Linsen

Die erreichte Fokuseffizienz der EADLC-Linse bei der Designbrennweite lag bei 47,64 %. Der theoretisch errechnete Wert von 69.17 % wurde dabei nicht erreicht. Dies lag vor allem an der zu geringen Auflösung der D/A-Karte (8-Bit) sowie dem in der Simulation nicht berücksichtigten Intensitätsverlust durch die Zuleitungselektroden aus Chrom.

### 6.1.5 Variation der Brennweite

Zur Erzeugung von Brennweiten zwischen der Designbrennweite und unendlich wird ein von Klaus et al. [48] vorgeschlagenes Ansteuerverfahren eingesetzt. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip, dass eine Wellenfront an beliebigen Stellen um eine Phase von  $\lambda$  versetzt werden darf, ohne dabei die ursprüngliche Form zu verlieren. Durch diesen Trick ist es unter Verwendung eines Gesamtphasenhubes von  $2\lambda$  trotz fest vorgegebener Elektrodenstruktur möglich, eine diffraktive Linse mit quasi-kontinuierlicher Brennweitenverschiebung zu realisieren. Zur Berechnung der richtigen Ansteuerspannungen geht man hierbei wie folgt vor: Aus der gewünschten Brennweite ermittelt man das benötigte Phasenprofil. Beginnend im Zentrum der ersten Zone wird vom Zentrum aus das berechnete Phasenprofil erzeugt. Ist am Rande der Zone der Phasenhub kleiner als  $\lambda$ , so übernimmt die Startelektrode der nächsten Zone den Phasenhub der vorangegangenen. Ist der Phasenhub größer  $\lambda$ , so findet zu Beginn der nächsten Zone ein Phasensprung von  $\lambda$  nach unten statt (siehe Abb. 6.12). Dies geschieht über alle Zonen. Die Phasenhub über den Chroelektroden werden zum Schluss mittels der PSC in Spannungswerte umgerechnet.

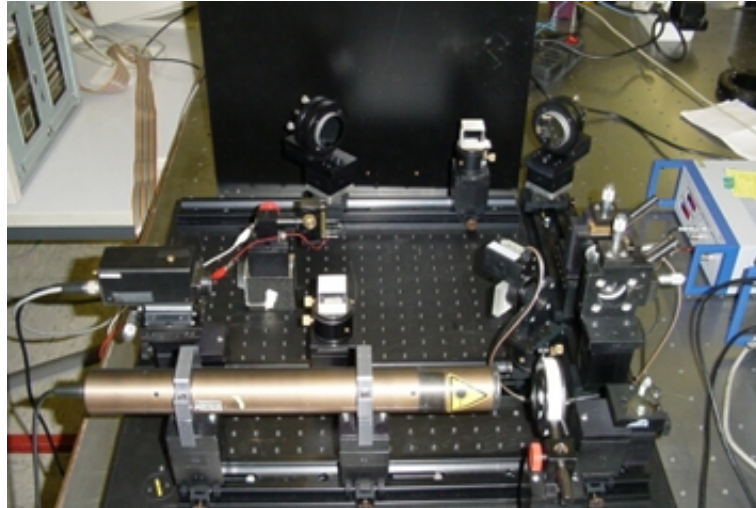


**Abb. 6.12:** Realisierung kontinuierlicher Brennweiten mittels des Modulo-Lambda-Prinzips. Im vorliegenden Beispiel wird an den Grenzen der zweiten zur dritten Zone (von links) kein Phasensprung ausgeführt. Nach der dritten Zone erfolgt ein  $\lambda$ -Phasensprung nach unten.

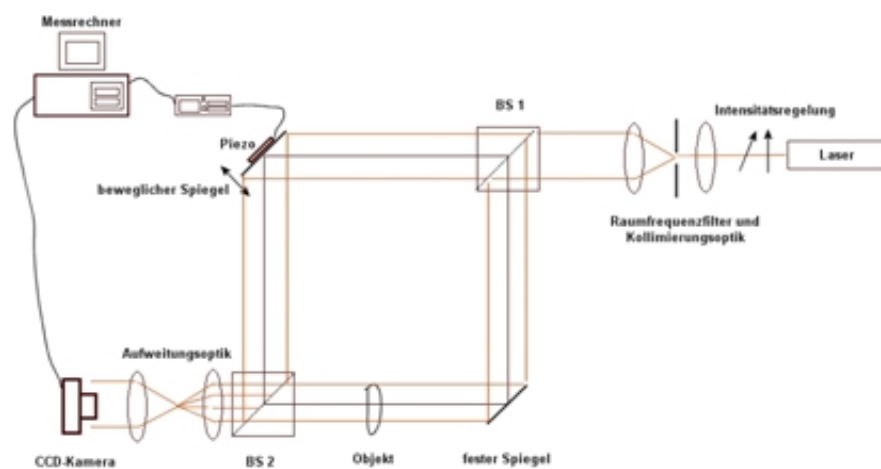
### 6.1.6 Interferometrische Vermessung

Zur Vermessung und Charakterisierung der Zellen war eine genaue Phasenmessung in den einzelnen Linsenzonen und damit eine sehr hohe laterale Auflösung von ca.  $20\ \mu\text{m}$  notwendig. Aufgrund der begrenzten lateralen Auflösung des Shack-Hartmann-Sensors von  $150\ \mu\text{m}$  (Mikrolinsendurchmesser) wurde zur Messung der Wellenfront ein Mach-Zehnder-Interferometer realisiert und zur Auswertung der Phaseninformation ein von Hariharan vorgeschlagener 5-Phasenschritt-Algorithmus implementiert.

## Implementierung



**Abb. 6.13:** Mach-Zehnder-Interferometer mit Piezo getriebenem Spiegel zur absoluten Phasenmessung.



**Abb. 6.14:** 5-Phasenschritt Mach-Zehnder Interferometer. Die beiden Polarisatoren dienen zur Intensitätsregulierung und Festlegung der Polarisationsrichtung. Es folgt die Fokussierung durch ein Pinhole, danach wird der Strahl kollimiert und gesplittet. Nach Durchlaufen des zu untersuchenden Objektes wird der Objekt- mit dem Referenzstrahl zur Interferenz gebracht. Sowohl Piezo-Treiber als auch der Framegrabber werden vom Messrechner aus gesteuert.

Das aufgebaute Interferometer (Abb. 6.13) wurde in einer Mach-Zehnder-Konfiguration auf einem luftgelagerten optischen Tisch aufgebaut. Der Piezo-Verschieber und die dazugehörige Treiberelektronik wurden über den Messrechner mittels serieller Schnittstelle



angesteuert. Derselbe Rechner war mit einer Framegrabber-Karte ausgestattet, welche die mit einer CCD-Kamera aufgenommenen Bilder übernahm. Das Schema des Versuchsaufbaus ist in Abb. 6.14 dargestellt.

### Der Hariharan-Algorithmus

Die Technik der *Phasenschritt-Interferometrie* rekonstruiert die relative Phase eines Wellenfeldes aus mehreren Aufnahmen der zugehörigen Interferenzmuster. Dazu wird in einem Interferometeraufbau einer der beiden Spiegel im Bereich der Wellenlänge verfahren und das Interferenzbild bei unterschiedlichen Spiegelpositionen aufgezeichnet. Es existieren mehrere Algorithmen, um aus diesen Bilddaten die Wellenfront zu rekonstruieren. Mathematisch benötigt werden nur drei Aufnahmen mit bekannter Weglängendifferenz der Teilstrahlen im Interferometer. Dies setzt jedoch eine genaue Einhaltung der Spiegelposition voraus. Da sich Fehlerquellen bei Messung und Ansteuerung nie völlig eliminieren lassen, sind Algorithmen entwickelt worden, die sich gegenüber Ungenauigkeiten in der Schrittweite wesentlich robuster verhalten. Ein solcher Algorithmus ist der *Hariharan-Algorithmus* [67]. Die relativen Phasen einer Wellenfront lassen sich so mit Gleichung 6.4 durch fünf Messungen bei Spiegelpositionen von  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$  und  $2\pi$  ( $2\pi = 1 \lambda$  optischer Weglänge) berechnen zu:

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (6.4)$$

Weiterhin erhält man einen Wert für die Modulation der verwendeten Daten, also eine Abschätzung für die Qualität der durchgeführten Messung:

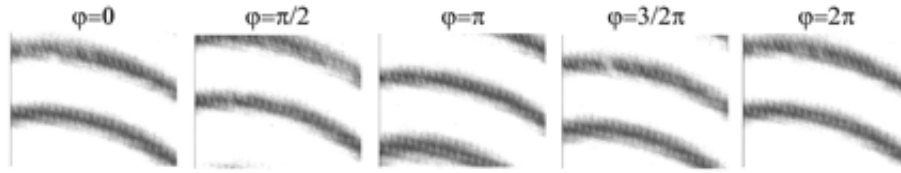
$$\gamma(x, y) = \frac{3 * \sqrt{4(I_4 - I_2)^2 + (I_1 + I_5 - 2I_3)^2}}{2(I_1 + I_2 + 2I_3 + I_4 + I_5)} \quad (6.5)$$

Hierbei stellen  $I_1$  bis  $I_5$  die aufgenommenen Intensitäten fünf verschiedener Interferogramme dar, die eine relative Phasendifferenz von  $\delta = \frac{\pi}{2}$  aufweisen. Abb. 6.15 zeigt ein Beispiel von 5 Interferogrammen, aus denen die Phaseninformation berechnet wird. Hierbei sind bei korrekter Verschiebung des Spiegels das erste und das fünfte Bild identisch.

Für die Aufnahme der Interferenzbilder, die Spiegelansteuerung sowie die Auswertung der erhaltenen Bilder wurden Programme in C und Matlab verwirklicht. Eine wesentliche Schwierigkeit bestand hierbei in der Entwicklung eines für die Auswertung geeigneten Unwrap-Prozesses.

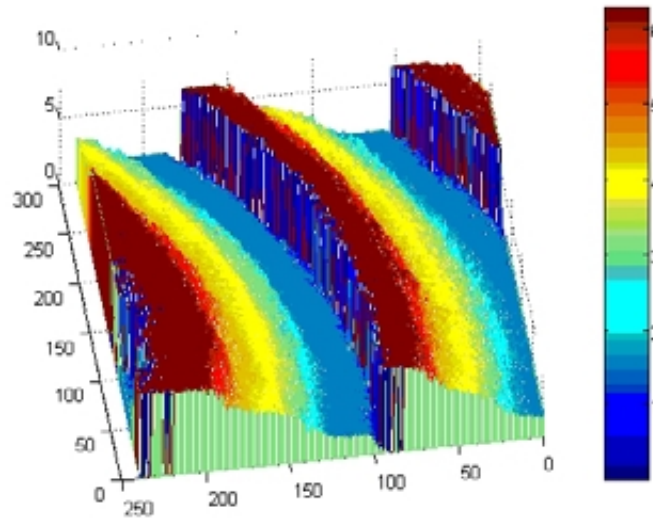
### Der Unwrap-Prozess

Gleichung 6.4 liefert die relative Phase der Wellenfront mit einem Wert zwischen  $0$  und  $2\pi$  (Abb. 6.16). Um aus dieser Information die gewünschte absolute Phase zu erhalten, ist ein



**Abb. 6.15:** Interferenzstreifen zweier leicht verkippter Wellenfronten. Von links nach rechts nimmt die Weglängendifferenz zu, zwischen zwei Bildern liegt ein relativer Gangunterschied der Teilstrahlen von  $\frac{\pi}{2}$ .

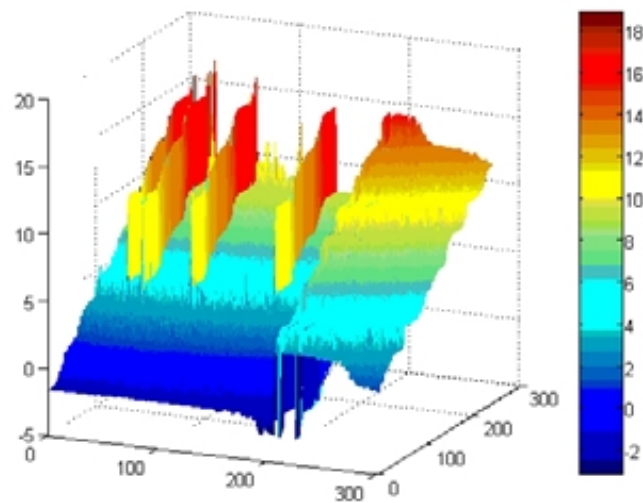
Entfalten (unwrapping) der relativen Phasenmatrix notwendig.



**Abb. 6.16:** Mit dem Hariharan-Algorithmus rekonstruierte Phase.

Einfache Unwrap-Algorithmen waren bereits in der Auswertungs-Software MATLAB implementiert. Diese gehen jedoch von einer Phasenmatrix ohne abrupte Phasensprünge aus, was in der Realität (Vibrationen, schlechte Datenmodulation, Abschottung z.B. durch Chromelektroden, etc.) fast nie der Fall ist. Daher wurde ein erweiterter Unwrap-Algorithmus implementiert, der Gebiete mit schlechter Datenmodulation und fehlerhaftem Phasensprung umläuft. Abb. 6.17 demonstriert die Problematik am Beispiel der Wellenfront aus Abb. 6.16. Deutlich sind die Diskontinuitäten zu erkennen, die sich, während des Unwrap-Prozesses einmal entstanden, entlang einer Dimension durch die gesamte Wellenfront ziehen.

Um diese Unzulänglichkeit zu überwinden, wurde ein Algorithmus implementiert, der Daten mit unvereinbaren Phasensprüngen identifiziert und diese beim Unwrap-Prozess geschickt umgeht. Dieser GZW-Algorithmus [68] (nach den Anfangsbuchstaben der Autoren



**Abb. 6.17:** Unwrap unter Verwendung von MATLAB-Algorithmen. Sobald ein Punkt falsch interpretiert wurde, zieht sich der entstandene Fehler über die gesamte Wellenfront.

Goldstein, Zebker und Werner) arbeitet in drei Teilschritten:

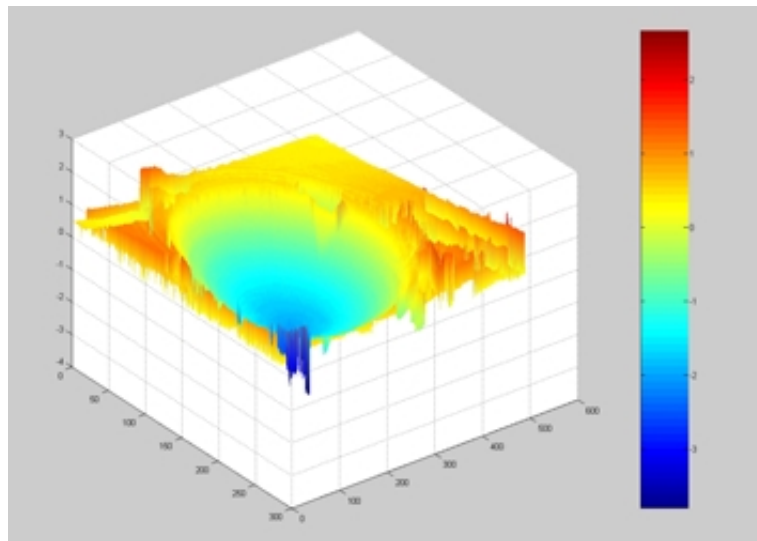
- Identifikation von inkonsistenten Daten (pos./neg. "Residuen")
- Verbinden verschieden gepolter Residuen durch so genannte "branch cuts"
- *Unwrap* der Wellenfront, ohne einen "branch cut" zu überschreiten

Die detaillierte Umsetzung des Algorithmus wird in der Arbeit von M. Schmiedchen [18] genauer erläutert.

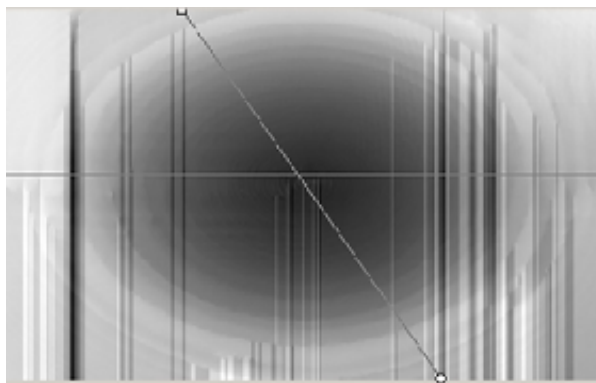
### Vermessen der Wellenfront

Nach Aufbau des Interferometers und Entwicklung der Ansteuersoftware wurden verschiedene Teile der EADLC-Linse interferometrisch vermessen. Eine kritische Zone der Linse stellt hierbei die durch das Conductive-Ladder-Meshing realisierte innerste Zone dar. Abb. 6.18 zeigt die Wellenfront dieser Zone bei der Realisierung eines Phasenhubs von einer Wellenlänge. Die Ansteuerspannungen an den Zuleitungen betrugen hierbei 0 V und 2 V.

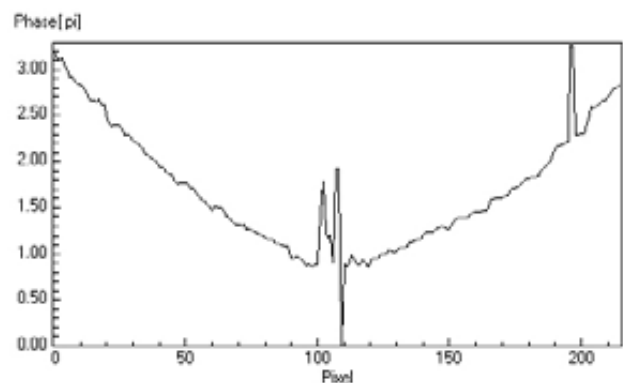
Abb. 6.19 zeigt den Querschnitt einer so erhaltenen Wellenfront. Abgesehen von Fehlern, die beim Unwrap-Prozess entstehen, lassen sich gegenüber den Shack-Hartmann-Sensor auch Details wie die Phasenplateaus und die nach außen hin anwachsenden Phasensprünge auflösen.



**Abb. 6.18:** Rekonstruierte Wellenfront der Mittelzone nach Optimierung mit dem Hariharan-Algorithmus. Der Peak-to-Peak Wert der Wellenfront betrug  $1 \lambda$ , wobei die innere Elektrode auf 0 V und die äußere Elektrode auf 2 V gelegt wurde.

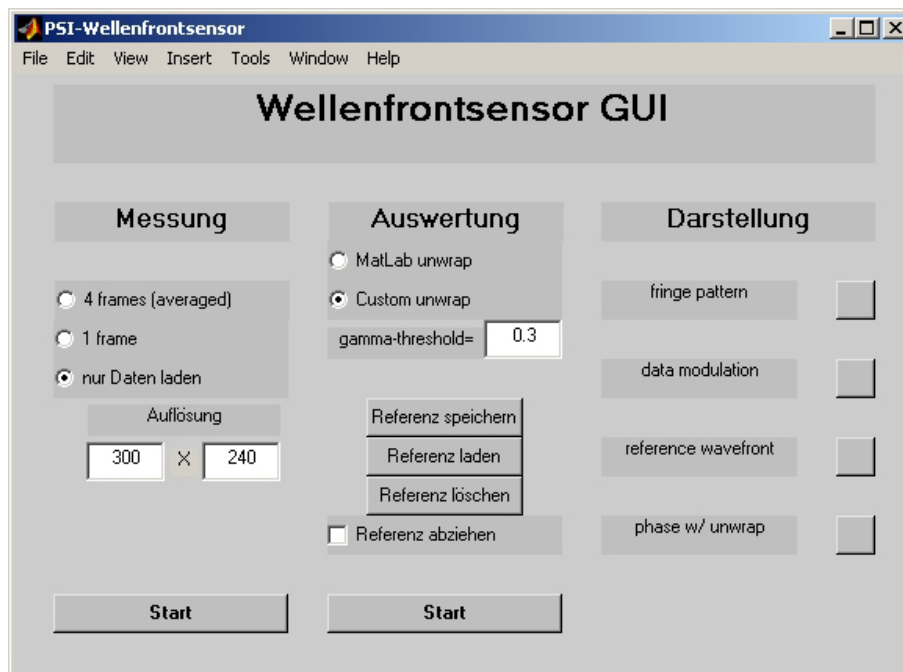


**Abb. 6.19:** 2D-Darstellung der rekonstruierten Phase der Mittelzone



**Abb. 6.20:** Querschnitt der rekonstruierten Phase

Die entstandene Ansteuer- und Auswertungssoftware wurde mit einer graphischen Benutzeroberfläche (Abb. 6.21) versehen, um die Bedienung des Programms auch für unerfahrene Benutzer zu ermöglichen. Neben dem Abspeichern und Laden von Daten ist die Aufnahme einer Referenzwellenfront, das Einstellen der Schwelle zum Auslassen schlechter Messpunkte sowie die Wahl des Unwrap-Algorithmus möglich.



**Abb. 6.21:** Grafische Benutzeroberfläche der entwickelten Software. In der linken Spalte lassen sich der Messvorgang starten und die Daten laden. In der mittleren Spalte kann der Matlab- oder der GZW-Algorithmus zum Entfalten der Phase gewählt und mit den Einstellmöglichkeiten rechts eine passende Darstellung generiert werden.

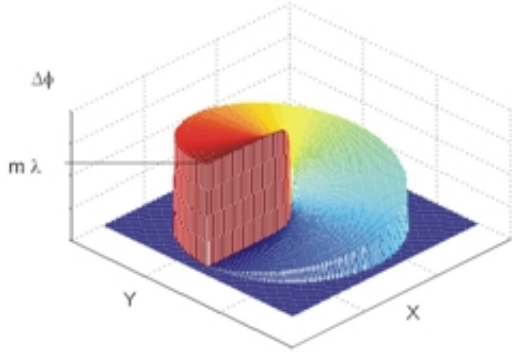
## 6.2 Adaptiver Strahlformer (Gauß → Doughnut)

Zum Erzeugen von Vortex-Solitonen [69], dem optischen Führen von kalten Atomen [70], dem hocheffizienten Einfangen und Festhalten von Mikropartikeln (Laser-Trapping) [71] [72] [73] sowie zum Rotieren von Mikropartikeln [74] wurde in Zusammenarbeit mit der Swinburne University of Technology, Australien ein adaptiver Strahlformer entwickelt [75], mit dem es möglich ist, das gaußförmige Strahlprofil eines Lasers dynamisch in ein doughnutförmiges Strahlprofil zu konvertieren. Das Umschalten zwischen gauß- und doughnutförmigem Intensitätsprofil wird durch den Einsatz eines adaptiven FK-Elementes möglich, dessen schaltbare helixförmige Phasenverteilung einen optischen Wirbel erzeugt. Die genaue Funktion des Elementes, das Design der Elektrodenstruktur sowie die Vermessung des während des Projektes entstandenen Strahlformers sind Thema dieses Abschnitts.

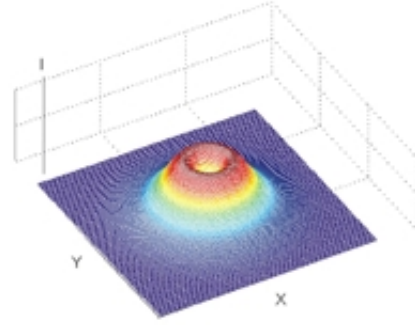
### 6.2.1 Optische Wirbel

Ein optischer Wirbel“ gehört zur Familie der Laguerre-Gauß’schen Moden und beschreibt eine optische Struktur mit einer schraubenförmigen (helixartigen) Phasen- (Abb. 6.22)

und einer doughnutförmigen Intensitätsverteilung (Abb. 6.23). Die Ganghöhe einer solchen Phasenschraube ist hierbei ein ganzzahliges Vielfaches  $m$  von  $\lambda$ , wobei  $m$  als topologische Ladung bezeichnet wird.



**Abb. 6.22:** Phasenverteilung eines optischen Wirbels



**Abb. 6.23:** Erzeugte doughnutförmige Intensitätsverteilung

Im Zentrum des Wirbels befindet sich keine Intensität, da dort alle Phasen koexistieren und somit destruktiv miteinander interferieren. Eine derartige Erscheinung wird als Phasensingularität bezeichnet. Die elektrische Feldverteilung eines linear polarisierten optischen Wirbels kann unter Vernachlässigung der Ausbreitungsrichtung in Zylinderkoordinaten  $\rho$ ,  $\varphi$  und  $z$  wie folgt beschrieben werden, wobei  $E_0$  die Amplitude des Lichtfeldes ist und  $\rho_0$  seine transversale Ausdehnung beschreibt:

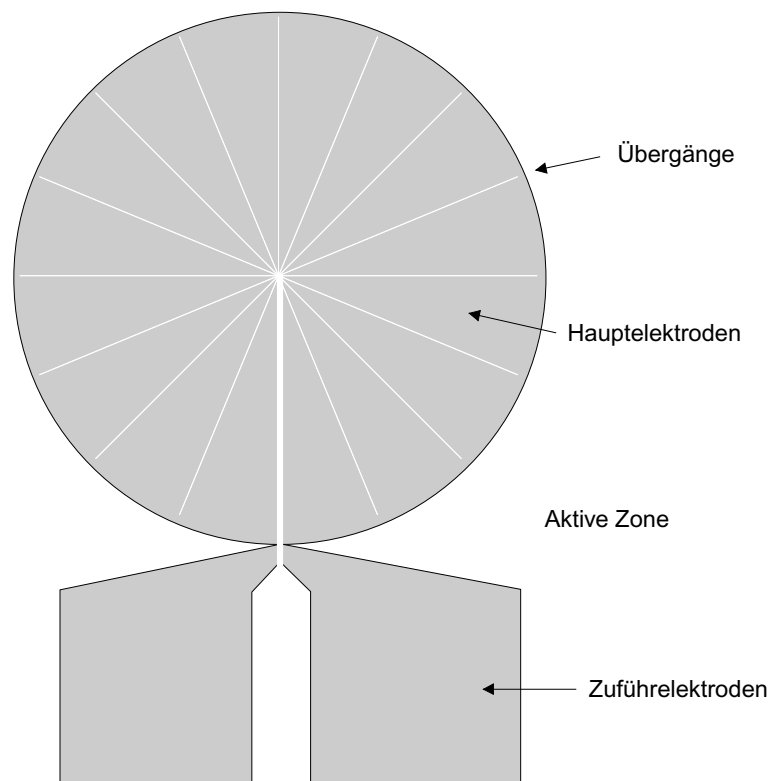
$$E_{\rho,\varphi,z} = E_0 \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^m e^{-\rho^2} e^{im\varphi} \quad (6.6)$$

Das Erzeugen eines optischen Wirbels kann auf verschiedene Weisen erfolgen: Durch Hologramme [76] [77], durch das direkte Aufprägen des helixartigen Phasenprofils mit Phasenmasken [78] [79], durch geeignete Strahlformung in einem Laserresonator [80] [81] sowie durch das hier vorgestellte FK-Element.

## 6.2.2 Elektrodendesign

Zum Erzeugen eines optischen Wirbels wurde das in Abb. 6.22 dargestellte Phasenprofil auf ein Elektrodenlayout übertragen und mittels Conductive-Ladder-Meshing eine effektive Ansteuerung implementiert.

Die aktive Zone des Elementes wird durch tortenförmige Hauptelektroden realisiert, die durch dünne Übergänge am äußeren Rand miteinander verbunden sind (Abb. 6.24). Durch Anlegen einer Spannungsdifferenz zwischen den Zuführelektroden kommt es zu einem tangentialen Spannungsabfall entlang des äußeren Randes. Für eine gute Annäherung des 1  $\lambda$  hohen Phasenprofils wurde die aktive Zone in 16 Zonen unterteilt. Dadurch konnten zum



**Abb. 6.24:** Elektrodenstruktur zum Erzeugen eines optischen Wirbels

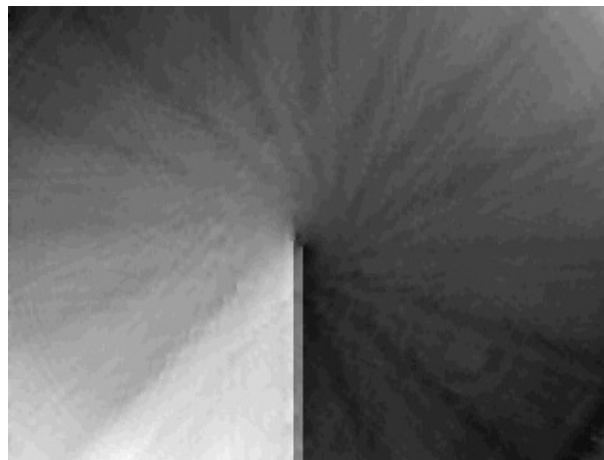
einen die Phasensprünge gering ( $1/16 \lambda$  für  $m=1$ ,  $2/16 \lambda$  für  $m=2$ , usw.), zum anderen die einzelnen Elektrodenflächen groß genug gewählt werden, um Beugung an den Kanten zu vermeiden. Nach der Herstellung der Elektrodenstruktur und dem Bau der FK-Zelle wurde das Element zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren untersucht. Neben der Prüfung von Fertigungsfehlern (Keilfehler, Einschlüsse, Leiterbahndefekte, etc.) war vor allem der Aspekt des realisierten Potentialabfalls über der aktiven Zone von Interesse. Abb. 6.25 zeigt den hergestellten und angesteuerten Strahlformer zwischen gekreuzten Polarisatoren. Die einzelnen Graustufen stellen den lokalen Phasenhub dar, welcher den ausgeprägten helixartigen Verlauf der Phase wiedergibt.

Für eine Absolutmessung des Phasenprofils wurde das in Abschn. 6.1.6 vorgestellte Mach-Zehnder-Interferometer eingesetzt und die durch die FK-Elemente erzeugte Phasenverteilung mittels der 5-Phasenschrittmethode bestimmt. Abb. 6.26 zeigt die so erhaltene Phasenverteilung nach dem Unwrap-Prozess.

Um die Funktion des Elementes zu überprüfen, wurde das Element mittels eines aufgeweiteten He-Ne-Lasers der Wellenlänge 633 nm durchleuchtet und die entstehende Intensitätsverteilung hinter dem FK-Element aufgezeichnet. Die so erhaltene Intensitätsverteilung ist in den Abbildungen 6.27 und 6.28 dargestellt.



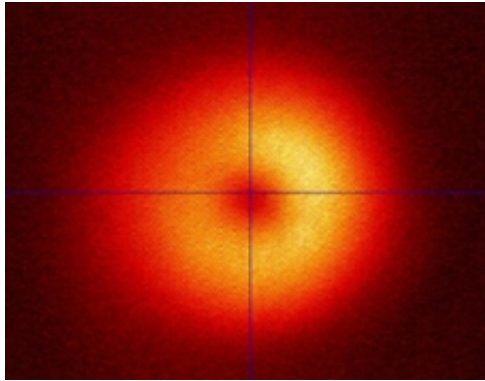
**Abb. 6.25:** FK-Strahlformer unter gekreuzten Polarisatoren



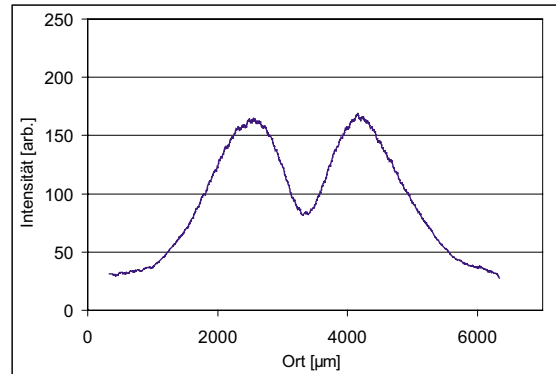
**Abb. 6.26:** Mittels des Mach-Zehnder-Interferometers gemessene Phasenverteilung im Zentrum der aktiven Zone

Zum Nachweis, dass es sich bei dem erzeugten Phasenprofil um den zu erwartenden Lasermode TEM<sub>01</sub>\* handelt, wurde ein Mach-Zehnder-Interferometer mit geeigneter Aufweitungsoptik aufgebaut und die Intensitätsmodulation mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet. Blendet man den Referenzstrahl aus, so erhält man die optische Antwort des Strahlformers, blendet man ihn ein, so lässt sich anhand des Interferenzmusters die Topologie des optischen Wirbels ablesen. Abbildungen 6.29 a-c zeigen die gemessene Intensitätsverteilung bei



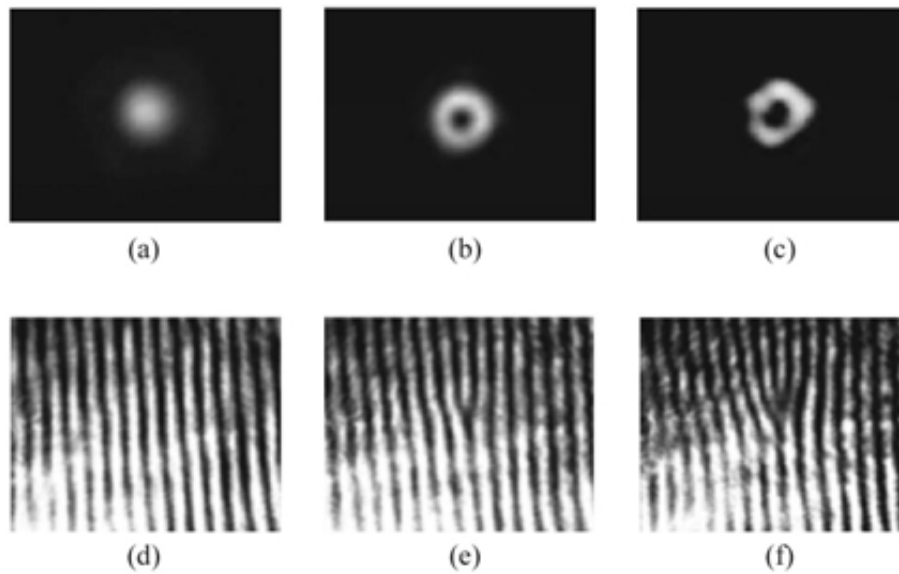


**Abb. 6.27:** Gemessene Intensitätsverteilung hinter dem Strahlformer



**Abb. 6.28:** Y-Querschnitt der erzeugten Intensitätsverteilung

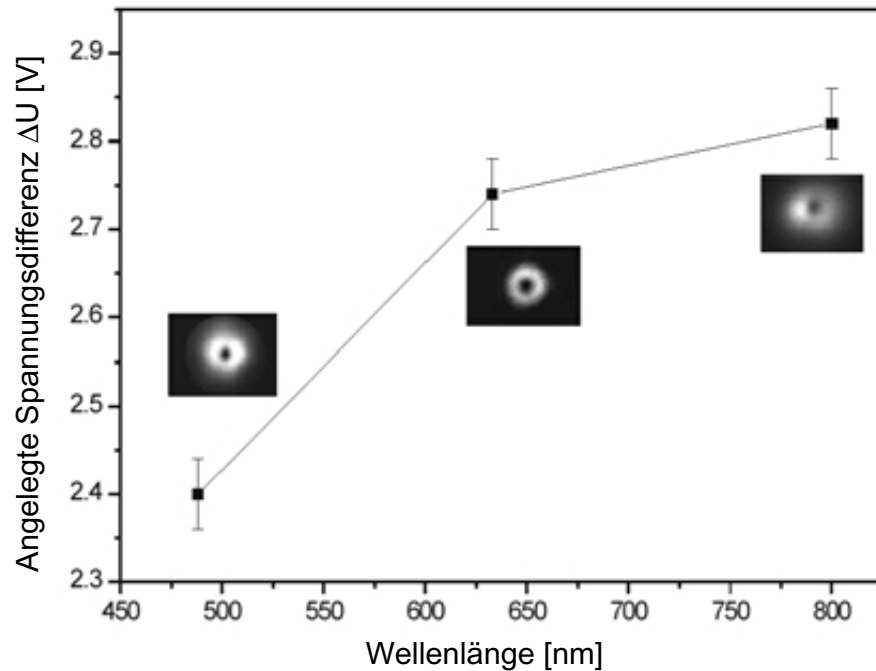
ausgeblendetem, Abbildungen 6.29 d-f die bei eingblendetem Referenzstrahl erzeugten Interferenzmuster.



**Abb. 6.29:** (a)-(c) Intensitätsverteilung hinter dem FK-Element und (d)-(f) korrespondierende Interferenzbilder. (a) und (d) Gaußstrahl, (b) und (e) Optischer Wirbel der Ladung 1, (c) und (f) Optischer Wirbel der Ladung 2.

Ist das Element ausgeschaltet, so befindet sich der Strahl im ursprünglichen  $TEM_{00}$ –*Mode* (a). Durch geeignete Wahl der Ansteuerspannungen wird ein optischer Wirbel erzeugt. Optische Wirbel der topologischen Ladung 1 zeigen ein Streifenmuster, bei dem an der Position der Singularität eine Aufspaltung zweier Interferenzstreifen auf drei, bei topologischer Ladung 2 auf vier Streifen stattfindet.

Gegenüber Hologrammen, Phasenplatten und Laserresonatoren erlaubt der hier entwickelte FK-Strahlformer eine dynamische Anpassung des Gesamthubes und ist so über einen großen Wellenlängenbereich einsetzbar. Um dies zu zeigen, wurde das Element bei drei verschiedenen Wellenlängen vermessen und die Ansteuerspannung manuell nachgeregelt. Abb. 6.30 zeigt die so erhaltenen optischen Wirbel bei einer Wellenlänge von 488, 633 und 800 nm, aufgetragen über der angelegten Spannungsdifferenz an den Zuführelektroden.



**Abb. 6.30:** Erzeugung von optischen Wirbeln im sichtbaren Wellenlängenbereich durch Variation der Ansteuerspannungen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass optische Wirbel der topologischen Ladung 1 und 2 für verschiedene Wellenlängen mit einer Effizienz von nahezu 100 % erzeugt und nachgewiesen werden konnten. Das Element besaß zudem eine hohe Transmission ( $\geq 85\%$ ) und zeigte aufgrund der guten Phasenapproximation so gut wie keine Beugung. Die Schaltzeiten beliefen sich je nach Phasenhub auf einige 100 ms und könnten unter Verwendung der in Abschn. 2.3.6 vorgestellten Techniken weiter reduziert werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung adaptiver Flüssigkristallmodulatoren zum Einsatz in optischen DVD-Laufwerken. Wesentliche Kriterien bei der Entwicklung waren eine hohe optische Qualität (geringe Wellenfrontfehler), schnelle Schaltzeiten, hohe Transmission und niedrige Ansteuerspannungen. Trotz dieser hohen Anforderungen war es zwingend notwendig, den Aufwand für die elektrische Ansteuerung im Vergleich zu existierenden FK-Modulatoren deutlich zu reduzieren, um adaptive FK-Elemente erstmalig in kommerziellen Massenprodukten etablieren zu können. Um die gesteckten Ziele zu erreichen, wurden Simulationen zu den Laufwerken durchgeführt und, darauf basierend, Konzepte zur Auslegung der adaptiven FK-Elemente erarbeitet. Die zur Herstellung notwendigen Fertigungstechniken mussten entwickelt, Messaufbauten zur Charakterisierung der Elemente und des Gesamtsystems geschaffen werden. Die gesamte Kette der Entwicklung, der Herstellung, der Vermessung sowie der Grundlagenuntersuchung an Materialien sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Zur Herstellung der Elemente waren eine Reihe von Voraussetzungen notwendig, die im Laufe dieser Arbeit geschaffen wurden. Ausgehend von der im Hause entwickelten Laserlithographie [34] [35] konnte durch Erweiterung der Anlage auf die Verarbeitung vektorieller Strukturen [39] die Schreibzeit für die benötigten Elektrodenmasken von Tagen auf Stunden reduziert und die Qualität der Strukturen gesteigert werden. Für die Herstellung ein- und mehrlageriger Elektrodenlayouts wurden leitfähige Schichten aus Chrom und ITO benötigt, die durch Erweiterung (Schichtdickenmessung, rotierende Substrathalter) im Hause vorhandener Sputter- und Elektronenstrahlverdampfungsanlagen selbst hergestellt werden konnten. So konnten Leit- und Antireflexschichten ( $MgF_2$ ) hoher Güte und Homogenität in Dicken zwischen 3 und 100 nm reproduzierbar hergestellt werden. Das Entwickeln der lithographisch belichteten Lackschichten sowie das nasschemische Ätzen der darunter liegenden leitfähigen Schichten erforderte eine genaue Prozesskontrolle und Kalibrierung. Für die Fertigung der Zellen konnten weitgehend Technologien aus dem Bereich der Displayherstellung übernommen werden, jedoch mussten labortaugliche Konzepte für die Kontaktierung und das Befüllen der Zellen erarbeitet sowie entsprechende Geräte entwickelt und gebaut werden.

Zur Entwicklung schneller Phasenmodulatoren ist eine genaue Kenntnis der Eigenschaften des FK-Materials erforderlich. Für nematische Flüssigkristalle wurden rechnergestützte Aufbauten zur Messung der relevanten Materialeigenschaften (Dispersion, Doppelbrechung, Phasenhub-Spannungs-Abhängigkeit) realisiert. Ein wesentliches Kriterium zum Einsatz von Phasenmodulatoren in mikrooptischen Systemen ist die Schaltzeit. Durch den Einsatz verschiedener Techniken (Transient-Nematic-Effekt, Einsatz von Zweifrequenzmischungen,

Temperaturerhöhung) konnten die Schaltzeiten von nematischen FK-Modulatoren deutlich reduziert werden (z.B. bei einem Phasenhub von  $1 \lambda$  von 38ms  $\rightarrow$  8 ms). Zur weiteren Reduktion von Schaltzeiten wurden ferroelektrische FK, sog. "Deformed Helical Ferroelectrics" (DHF), untersucht sowie geeignete Ansteuerrountinen zum Schalten dieser Materialien entwickelt. Hierdurch wurde es erstmals möglich, schaltbare Linsen (binäre Fresnelzonelinse, Phasenhub  $\lambda/2$ ) unter Verwendung ferroelektrischer Materialien mit Schaltzeiten unter 0.3 ms zu realisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Elemente für DVD- und BluRay-Laufwerke (DVD-Nachfolger, Markteinführung 2003/2004) konzipiert und hergestellt.

Für die DVD wurde an einem neuartigen Dual-Fokus-Pickup mitgearbeitet, das in der Arbeitsgruppe *Mikrooptische Systeme* in Zusammenarbeit mit der Deutschen Thomson Brandt entwickelt wurde. Zur Entwicklung eines kompakten und kosteneffizienten Systems wurden das Konzept einer modularen Bauweise sowie die Integration diffraktiver optischer Elemente verfolgt. Zum Fokussieren auf beide Datenschichten wurden FK-Linsen entwickelt, die in der Lage sind, zwei polarisationsabhängige Foki zu erzeugen und deren Abstand durch Anlegen eines elektrischen Feldes zu verändern. Diese Funktion war notwendig, um Dickenschwankungen der zwischen den Datenebenen liegenden Schicht zu kompensieren. Die CLC-Linse erlaubte im Pickup die Erzeugung zweier axialer Foki, die ADLC-Linse die Verschiebung der Foki gegeneinander. Die hierbei entstandenen Flüssigkristalllinsen (CLC-, ADLC-Linse) wurden in den Abschnitten 4.3 und 4.4 vorgestellt. Die nahezu beugungsbegrenzt arbeitende CLC-Linse hatte ein Durchmesser von 5 mm und erlaubte die Verschiebung der Brennweite von 350 mm bis unendlich bei Schaltzeiten von 1-2 Sekunden. Die ADLC-Linse erlaubte eine Verschiebung der Brennweite im Bereich von 50 cm bis unendlich, zeigte jedoch aufgrund des diffraktiven Phasenprofils Wirkungsgrade zwischen 20 und 50 %. Die Schaltzeiten lagen unter Verwendung nematischer FKe bei 50 ms (geblaztes Fresnelprofil) und 10 ms (binäres Fresnelprofil). Die Funktion des entwickelten Laufwerk-Konzeptes konnte anhand aufgebauter und vermessener Testlaufwerke erfolgreich demonstriert werden.

Zum Einsatz in BluRay-Laufwerken wurden zwei adaptive Kompensationselemente zur Korrektur von Koma und sphärischen Aberrationen entwickelt, die beim Schichtwechsel und beim Verkippen der Disk auftretende Wellenfrontfehler korrigieren. Durch den Einsatz von Meshing-Techniken wurde es möglich, komplexe Wellenfrontprofile (Koma) unter Verwendung von nur 3 Elektroden zu erzeugen. Durch das einlagige Elektrodenlayout und die planare Zellgeometrie können die Herstellungskosten solcher Elemente gering gehalten werden. Neben den planaren Elementen kam eine für diese Anwendung modifizierte CLC-Linse zum Einsatz. Messungen an einem bei der DTB aufgebauten Testlaufwerk zeigten eine sehr gute Performance der eingesetzten Elemente. Die erreichten Jitterwerte von 6.9 % waren mit denen klassischer Korrektursysteme (verstellbare Teleskopoptik, 6.3 %) vergleichbar. Im Gegensatz zu mechanischen Systemen sind auf FKen basierende Lösungen jedoch kompakter, was sie für den Einsatz in mikrooptischen Systemen hervorragend eignet.

Durch die Freiheiten beim Design der Elektrodenstruktur und der Zellgeometrie können FK-Elemente auf eine Vielzahl von Anwendungen ausgelegt werden. Neben den für den

Einsatz in optischen Laufwerken entwickelten Elementen wurden in der Arbeitsgruppe *Mikrooptische Systeme* Elemente zur Speckle-beseitigung [59], zur Strahlablenkung [37] und Strahlformung [75] sowie eine verbesserte Variante der ADLC-Linse [18] konzipiert und hergestellt. Am Beispiel des Strahlformers (TEM00→TEM01\*-Mode) kann die Vielseitigkeit adaptiver FK-Elemente demonstriert werden. Unter Verwendung von nur 3 Ansteuer Elektroden konnten optische Wirbel zum Lasertrapping mit topologischer Ladung  $n=1$  und  $n=2$  erzeugt und interferometrisch nachgewiesen werden. Das Element konnte durch Ändern der Ansteuerspannungen für verschiedene Wellenlängen im sichtbaren Bereich eingesetzt werden.

**Ausblick** Die Einsatzmöglichkeiten und die Optimierung der FK-Elemente sind mit Abschluss dieser Arbeit noch nicht ausgereizt und werden in Zukunft in der Arbeitsgruppe weiter vorangetrieben. Verbesserungen sind insbesondere beim Elektrodenlayout, der Zellgeometrie und bei den FK-Materialien zu erwarten.

Beim Elektrodenlayout können zum Erweitern der Funktionalität mehrere Querelektroden (Erzeugen interner Spannungsabfälle) eingesetzt werden, wodurch das Spannungs- und somit das Phasenprofil besser auf die Anwendung zugeschnitten werden kann. Der Einsatz mehrlagiger Elektrodenschichten ist technologisch anspruchsvoll, kann aber zu einer Verbesserung der Wellenfront führen, da der Einfluss störender Zuleitungen minimiert wird.

Durch Einsatz verschiedener Zellgeometrien (Linsen, Mikrooptiken, Freiformflächen, DOEs) können mit planaren Elektroden auf beiden Innenseiten eines FK-Körpers neue optische Funktionen realisiert werden (z.B. schaltbare Mikrolinsenarrays, schaltbare DOEs). Durch Kombination von Zellgeometrie und geeignetem Elektrodenlayout lassen sich zusätzliche Funktionen integrieren (z.B. Mikrolinsenarrays mit einzeln schaltbaren Linsen).

Wesentliche Verbesserungen sind durch die Entwicklung neuer FK-Materialien und Materialkombinationen (FK-Polymere, FK-Aerosil-Mischungen) zu erwarten. Hierbei müssen optische (Transparenz, Doppelbrechung, Streuung) wie elektrooptische (Polarisierbarkeit, Viskosität) Eigenschaften verbessert werden. Die Verbesserung des Schaltverhaltens bei Nematenn kann durch Reduktion der Rotationsviskositäten erfolgen. Die im Rahmen dieser Arbeiten untersuchten Effekte wie die Reduktion der Rotationsviskosität durch Erhöhung der Temperatur sowie die Verwendung von nematischen Zwei-Frequenzmischungen bzw. der Einsatz von ferroelektrischen FKs sind hierbei ein erster Schritt.



# Literaturverzeichnis

- [1] J.B. Khurgin and J.U. Kang, *Ultrabroad-bandwidth electro-optic modulator based on a cascaded bragg grating*, Opt. Lett. **25**, 70-72 (2000).
- [2] Fujitsu, *Dual drive 10gb/s ln modulator with monitor pd, typ ftn7921er*, Datenblatt Fujitsu (2002).
- [3] H. Fujita and H. Toshiyoshi, *Optical mems*, IEICE Trans. Electron. **E83-C** (2000).
- [4] G.D. Love. *Adaptive Optics for Industry and Medicine*. World Scientific, 2nd Edition, 1999.
- [5] M.A. Helmbrecht, U. Srinivasan, C. Rembe, R.T. Howe and R.S. Muller, *Micromirrors for adaptive-optic arrays*, Proc. Transducers '01 (2001).
- [6] S.W. Chung and Y.K. Kim, *Fabrication and measurements of 10x10 micro slm array for phase and amplitude modulation*, Proc. of MEOMS'99, Mainz, Germany, 49-53 (1999).
- [7] R.K. Mali, T.G. Bifano, N. Vandelli and M.N. Horenstein, *Development of microelectromechanical deformable mirrors for phase modulation of light*, Opt. Eng. **36**, 542-548 (1997).
- [8] T.Bourouina, E. Lebrasseur, G. Reyne, A. Debray, H. Fujita, A. Ludwig, E. Quandt, H. Muro, T. Oki and A. Asaoka, *Integration of two degree-of-freedom magnetostrictive actuation and piezoresistive detection: application to a two-dimensional optical scanner*, J.Microelectromech. Sys. **11**, 355-361 (2002).
- [9] H. Sehr, A.G. Evans, A. Brunnschweiler, G.J. Ensell and T.E. Niblock, *Fabrication and test of thermal vertical bimorph actuators for movement in the waveplane*, J. Micromech. Mircoeng. **11**, 306-310 (2001).
- [10] N. Clark and P. Furth, *Design and performance evaluation of a silicon eye using micromirrors*, Proc. SPIE (Design, Characterization, and Packaging for MEMS and Microelectronics) **3893**, 304-313 (1999).
- [11] V. Laude, *Twisted-nematic liquid-crystal pixelated active lens*, Opt. Comm. **153**, 134-152 (1998).

- [12] P.T. Kazlas, K.M. Johnson and D.J. McKnight, *Miniature liquid-crystal-on-silicon display assembly*, Opt. Lett. **23**, 972-974 (1998).
- [13] J. Gonglewski, S. Restaino, J. Martin, J. Phillips, M. Hartman, S. Browne, P. Kervin and J. Snodgrass, *Demonstration of new technology mems and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites*, Opt. Express **10**, 1508-1518 (2002).
- [14] R. M. Koehl, T. Hattori and K.A. Nelson, *Automated spatial and temporal shaping of femtosecond pulses*, Opt. Comm. **157**, 57-61 (1998).
- [15] I.C. Khoo and S.T. Wu. *Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals*. World Scientific, 1993.
- [16] V.G. Chigrinov. *Liquid Crystal Devices*. Artech House, 1999.
- [17] R. Glöckner, *Schnell schaltbare adaptive Flüssigkristall-Linsen mit tangential symmetrischer Elektrodenstruktur*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2000).
- [18] M. Schmiedchen, *Schnell schaltbare diffraktive Linse auf Flüssigkristallbasis*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2002).
- [19] S.T. Wu, U. Efron and L.D. Hess, *Birefringent measurements of liquid crystals*, Appl. Opt. **23** (1984).
- [20] S.T. Wu and C.S. Wu, *High speed liquid crystal modulators using the transient nematic effect*, J. Appl. Phys. **65** (1989).
- [21] S.T. Wu, *Nematic liquid crystal modulator with response time less than 100  $\mu$ s at room temperature*, Appl. Phys. Lett. **57**, 986-988 (1990).
- [22] S.T. Wu and C.S. Wu. *Optical Materials: Small angle relaxation of highly deformed nematic liquid crystals*. Marcel Dekker Verlag, New York, 1990.
- [23] S.T. Wu, A. M. Lackner and U. Efron, *Optimal operation temperature of liquid crystal modulators*, Appl. Opt. **26** (1987).
- [24] B. Pieper, *Dual-frequency addressing of liquid crystal matrix displays with three drive frequencies*, Displays **6**, 157-158 (1985).
- [25] Z. Lin, S.D. Heavin, B.M. Fung, J.J. Sluss and T.E. Batchman, *Electro-optic performance of a pdlc film utilizing dual-frequency addressing*, Proc. SPIE (Liquid crystal Materials, Devices and Applications) **1665**, 13-19 (1992).
- [26] S.T. Wu. *Optical Materials. Chapt. 1: Nematic liquid crystals for adaptive optics*. Marcel Dekker Verlag, New York, 1990.
- [27] M. Schadt, *Low-frequency dielectric relaxation in nematics and dual-frequency addressing of field effects*, Mol. Cryst. Liq. Crystl. **89** (1982).



- [28] Y. Panarin, E. Pozhidaev and V. Chigrinov, *Dynamics of controlled birefringence in an electric field deformed helical structure of a ferroelectric liquid crystal*, *Ferroelectrics* **114**, 181-186 (1991).
- [29] L.A. Beresnev et al., *Deformed helical ferroelectric liquid crystal display: a new electro-optic mode in ferroelectric chiral smectic c liquid crystal*, *Liq. Cryst.* **5**, 1171-1177 (1989).
- [30] V. Chigrinov et al., *Aligning properties and anchoring strength of ferroelectric liquid crystals*, *Ferroelectrics* **178**, 145-154 (1996).
- [31] Y. Ouchi, H. Takezoe and A. Fukuda, *Switching process in ferroelectric liquid crystals: disclination dynamics of the surface stabilized states*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **26** (1987).
- [32] N.A. Clark and S.T. Lagerwall, *Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals*, *Appl. Phys. Lett.* **36** (1980).
- [33] S. Stankovic, *Diffraktive optische Elemente für moderne mikrooptische Systeme*, Dissertation, TU Darmstadt (2002).
- [34] S. Stankovic, *Entwicklung eines Laserlithographiesystems zur Mikrostrukturierung*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (1997).
- [35] L. Benmohammadi, *Herstellung und Berechnung von diffraktiven optischen Elementen*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (1999).
- [36] J. Spannhake, *Design, Herstellung und Ansteuerung einer Flüssigkristalllinse auf der Basis einer mehrschichtigen Elektrodenstruktur*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2001).
- [37] S. Somalingam, *Adaptive Elemente auf der Basis von Flüssigkristallen*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2001).
- [38] M. Hage, *Multifunktionale Phasenmodulatoren auf der Basis von schnellen Flüssigkristallen*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2003).
- [39] M. Budach, *Anwendung der Laserlithographie in der diffraktiven und der adaptiven Optik*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2001).
- [40] W. von Spiegel, *Laserlithographie zur Entwicklung kontinuierlich strukturierter diffraktiv-optischer Elemente und anderer Anwendungen*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2002).
- [41] J. Taylor. *DVD Demystified*. McGraw-Hill, 2000.
- [42] D. Dias, *Hochfrequente Gitterstrukturen für Anwendungen in optischen Systemen*, Dissertation, TU Darmstadt (2003).

- [43] T. Krupenkin, S. Yang and P. Mach, *Tunable liquid microlens*, Appl. Phys. Lett. **82**, 316-318 (2003).
- [44] G.V. Vdovin, I.R. Guralnik, S.P. Kotova, M.Y. Loktev and A.F. Naumov, *Liquid-crystal lenses with a controlled focal length. i. theory*, Quant. Elect. **29**, 256-260 (1999).
- [45] A.F. Naumov, G.D. Love, M.Y. Loktev and F.L. Vladimirov, *Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses*, Opt. Express **4**, 344-352 (1999).
- [46] T. Scharf, P. Kipfer, M. Bouvirer and J. Grupp, *Diffraction limited liquid crystal microlenses with planar alignment*, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 6639-6636 (2000).
- [47] M. Honma, T. Nose and S. Sato, *Enhancement of numerical aperture of liquid crystal microlenses using a stacked electrode structure*, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 4799-4802 (2000).
- [48] W. Klaus, I. Masafumi, H. Yutaka and A. Yoshinori, *Efficient liquid crystal wavefront modulator*, Proc. SPIE, Vol. 3015 (1997).
- [49] Y. Sun, T. Kowel and G.P. Nordin, *Circular geometry liquid crystal adaptive lens with fresnel lens phase profile*, Proc. SPIE, Vol. 3955, 120-131 (2000).
- [50] S. Sato, *Liquid-crystal lens-cells with variable focal length*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 18, 9, 1679-1684 (1979).
- [51] L.G. Commander, S.E. Day and D.R. Selviah, *Variable focal length microlenses*, Opt. Comm., Vol. 177, 157-170 (2000).
- [52] S. Suyama, M. Date and H. Takada, *Three-dimensional display system with a dual-frequency liquid-crystal varifocal lens*, Jap. J. Appl. Phys. **39**, 480-484 (2000).
- [53] S. Sato, A. Sugiyama and R. Sato, *Variable-focus liquid-crystal fresnel lens*, Jap. J. Appl. Phys. **24**, 626-628 (1985).
- [54] J. Eschler, *Steuerbare optische Phasenmodulatoren mit Flüssigkristallzellen*, Dissertation, Universität Karlsruhe (1996).
- [55] J.W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics, Second Edition*. McGraw Hill, 1968.
- [56] S. Dickmann, *Numerische Berechnung der Feld- und Molekülausrichtung in Flüssigkristallanzeigen*, Dissertation, Universität Karlsruhe (1994).
- [57] D. Dias, S. Stankovic, H. Haidner, L.L. Wang, T. Tschudi, M. Ferstl and R. Steingrüber, *High-frequency gratings for applications to dvd pickup systems*, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. **3** (2001).
- [58] C. Karaboue, *Fokusvermessung für ein optisch integriertes CD/DVD Pick-up System*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (1999).

- [59] K. Somalingam, *Schnelle adaptive optische Elemente auf der Basis von Flüssigkristallen zur Kompensation von Aberrationen mit hoher Effizienz*, Dissertation, TU Darmstadt (wird noch veröffentlicht).
- [60] F. Yokogawa, S. Ohsawa, T. Iida, Y. Araki, K. Yamamoto and Y. Moriyama, *The path from a digital versatile disc (dvd) using a red laser to a dvd using a blue laser*, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 2176-2178 (1998).
- [61] S. Stallinga, J. Vrehen, J. Wals, H. Stapert and E. Verstegen, *Liquid crystal aberration compensation devices*, Proc. SPIE (Optical Storage and Information Processing) **2404** (2000).
- [62] M. Hain, S. Somalingam and T. Tschudi, *Optisches Kompensationselement*, WO 02/056099 A1 (angemeldet 12.1.01).
- [63] Y.V. Martynov, B.H. Hendriks, F. Zijp, J. Aarts, J.P. Baartman, G. v. Rosmalen, J.J. Schleipen and H. v. Houten, *High numerical aperture optical recording: Active tilt correction or thin cover layer*, Jpn. J. Appl. Phys. **38**, 1786-1792 (1999).
- [64] S.G. Stan. *The CD-Rom Drive*. Kluwer Academic, 1998.
- [65] D. Ploß, *Speckelreduktion bei Laserbildprojektion*, Diplomarbeit, Fachhochschule München (2002).
- [66] K. Dressbach, *Charakterisierung von Flüssigkristallzellen zum Einsatz in Blue-DVD Systemen*, Diplomarbeit, TU Darmstadt (2002).
- [67] D. Malacara. *Optical Shop Testing*. John Wiley and Sons Inc., 1992.
- [68] R.M. Goldstein, H.A. Zebker and C.L. Werner, *Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping*, Radio Science, Vol. 23, 4 (1988).
- [69] J. Christou, V. Tikhonenko, Y.S. Kivshar and B. Luther-Davies, *Vortex soliton motion and steering*, Opt. Lett. **21** (1996).
- [70] X. Xu, K. Kim, W. Jhe and N. Kwon, *Efficient optical guiding of trapped cold atoms by a hollow laser beam*, Phys Rev. A **63** (2001).
- [71] A. Ashkin, *Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime*, Biophys. J. **61** (1992).
- [72] A.D. Mehta, M. Rief, J.A. Spudich, D.A. Smith and R. M. Simmons, *Single-molecule biomechanics with optical methods*, Science **283** (1999).
- [73] K.T. Gahagan and G.A. Swartzlander, *Optical vortex trapping of particles*, Opt. Lett. **21** (1996).

- 
- [74] L. Paterson, M.P. MacDonald, J. Arlt, W. Dultz, H. Schmitzer, W. Sibbet and K. Dholakia, *Controlled simultaneous rotation of multiple optically trapped particles*, Science **292** (2001).
- [75] D. Ganic, X. Gan, M. Gu, M. Hain, S. Somalingam, S. Stankovic and T. Tschudi, *Generation of doughnut laser beams by use of a liquid-crystal cell with a conversion efficiency near 100%*, Opt. Lett. **27** (2002).
- [76] N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, H. Rubinsztein-Dunlop and M.J. Wegener, *Laser beams with phase singularities*, Opt. Quantum Electron. **24** (1992).
- [77] M. Reicherter, T. Haist, E.U. Wagemann and H.J. Tiziani, *Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display*, Opt. Lett. **24** (1999).
- [78] S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer and G.V. Uspleniev, *The phase rotor filter*, J. Mod. Opt. **39** (1992).
- [79] M.W. Beijersbergen, R.P. Coerwinkel, M. Kirstensen and J.P. Woerdman, *Wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate*, Opt. Comm. **112** (1994).
- [80] J.M. Vaughan and D.V. Willetts, *Temporal and interference fringe analysis of  $tem_{01}^*$  laser modes*, J. Opt. Soc. Am. **73** (1983).
- [81] C. Tamm and C. O. Weiss, *Bistability and optical switching of spatial patterns in a laser*, J. Opt. Soc. Am. B **7** (1990).

## Publikationsliste

### Veröffentlichungen

1. M. Hain, R. Glöckner, S. Bhattacharya, D. Dias, S. Stankovic, T. Tschudi, *Fast switching liquid crystal lenses for a dual focus digital versatile disc pickup*, Opt. Comm. **188**, 291-299 (2001)
2. S. Stankovic, D. Dias, M. Hain, S. Bhattacharya, R. Glöckner, C. Karaboue, L. Benmohammadi, F. Guessous, T. Tschudi, M. Ferstl, E. Pawlowski, R. Steingrüber, B. Kuhlow, L.L. Wang, *Integrated optical pickup system for axial dual focus*, Appl. Opt. **40**, 5 (2001)
3. D. Ganic, X. Gan, M. Gu, M. Hain, S. Somalingam, S. Stankovic, T. Tschudi, *Generation of doughnut laser beams by use of a liquid-crystal cell with a conversion efficiency near 100%*, Opt. Lett. **27**, 15 (2002)
4. T. Tschudi, L.L. Wang, S. Stankovic, M. Hain, S. Bhattacharya, D. Dias, L. Benmohammadi, C. Karaboué, E. Pawlowski, M. Ferstl, *Integrated optical pickup for optical discs*, Proc. SPIE (ICO XVIII: Optics for the next millenium), **3749**, 411-412 (1999)

### Tagungsbeiträge

#### 1997

1. L.L. Wang, M. Hain, T. Tschudi, *Bifocal and autofocal image systems for optical pickup*, Proc. Techn. Digest MOC/GRIN'97 AP971222, Tokyo, Japan (1997)
2. M. Hain, L. L. Wang, T. Tschudi, *Schaltbares bifokales Abbildungssystem*, DGaO Jahrestagung, Staffelstein (1997)
3. L.L. Wang, M. Hain, T. Tschudi, *Bifocal image systems by using diffractive optical elements and liquid crystals*, EOS Topical Meeting on diffractive Optics, Savolinna, Finnland (1997)
4. L.L. Wang, M. Hain, T. Tschudi, *A variable focusing system for dvd*, OSA Annual Conference, Long Beach, USA (1997)

## 1998

1. M. Hain, L.L. Wang, T. Tschudi, *Schnelle optische Fokusbildung unter Verwendung von ferroelektrischen Flüssigkristallen*, DGaO Jahrestagung, Bad Nenndorf (1998)

## 1999

1. M. Hain, R. Glöckner, S. Bhattacharya, S. Stankovic, T. Tschudi, *Fast switching electrooptical lenses based on nematic and ferroelectric liquid crystals*, Ferroelectrics, Darmstadt (1999)
2. R. Glöckner, M. Hain, S. Bhattacharya, L.L. Wang, S. Stankovic, T. Tschudi, *Schnell schaltende optische Elemente auf der Basis ferroelektrischer Flüssigkristalle*, DGaO Jahrestagung, Berlin (1999)

## 2000

12. S. Stankovic, M. Hain, D. Dias, S. Bhattacharya, R. Glöckner, T. Tschudi, M. Ferstl, E. Pawlowski, R. Steingrüber, B. Kuhlow, L.L. Wang, *Pickup System für axialen Doppelfokus mit diffraktiven optischen Elementen*, DGaO Jahrestagung, Jena (2000)
13. M. Hain, R. Glöckner, S. Bhattacharya, S. Stankovic, T. Tschudi, *Schnell schaltbare Flüssigkristalllinse basierend auf dem Transient Nematic Effekt*, DGaO Jahrestagung, Jena (2000)
14. S. Somalingam, M. Budach, M. Hain, S. Stankovic, T. Tschudi, *Strahlablenkung durch Phasenmodulation in einer Flüssigkristallschicht*, DGaO Jahrestagung, Jena (2000)
15. S. Stankovic, D. Dias, M. Hain, S. Bhattacharya, R. Glöckner, C. Karaboué, L. Benmohammadi, F. Guessous, L.L. Wang, T. Tschudi, M. Ferstl, E. Pawlowski, R. Steingrüber, B. Kuhlow, *Integrated optical pickup system for axial dual focus*, OSA-Diffractive Optics and Micro-Optics, Québec City, Canada (2000)
16. S. Bhattacharya, S. Stankovic, D. Dias, M. Hain, R. Glöckner, C. Karaboué, L. Benmohammadi, F. Guessous, T. Tschudi, M. Ferstl, E. Pawlowski, R. Steingrüber, B. Kuhlow, L.L. Wang, *Dual layer digital versatile disk pickup integrating opto-electronic and diffractive elements*, CLEO/Europe-IQEC, Nizza, Frankreich (2000)
17. M. Hain, R. Glöckner, S. Bhattacharya, S. Stankovic, T. Tschudi, *Fast electro-optical lenses using liquid crystals*, CLEO/Europe-IQEC, Nizza, Frankreich (2000)
18. T. Tschudi, L. Wang, S. Stankovic, M. Hain, S. Bhattacharya, D. Dias, L. Benmohammadi, C. Karaboué, E. Pawlowski, M. Ferstl, *An integrated optical pickup*

*for high resolution digital storage and optical measuring technique*, Nanoscale Optics Conference, Engelberg (2000)

19. T. Tschudi, L. Wang, S. Stankovic, M. Hain, S. Bhattacharya, D. Dias, L. Benmohammadi, C. Karaboué, E. Pawlowski, M. Ferstl, *An integrated optical pickup for high resolution digital storage and optical measuring technique*, ROMOPTO, Bukarest (2000)

## 2001

22. S. Somalingam, M. Hain, W. v. Spiegel, M. Budach, S. Stankovic, T. Tschudi, *Wellenfrontkorrektur mit hohem Wirkungsgrad und einfacher Ansteuerung*, DGaO Jahrestagung, Göttingen (2001)

## 2002

25. M. Hain, S. Somalingam, M. Schmiedchen, K. Dreßbach, S. Stankovic, T. Tschudi, *Dynamische Flüssigkristallelemente zur Phasenkorrektur - Design und Anwendungen*, DGaO Jahrestagung, Innsbruck (2002)
26. K. Dressbach, S. Somalingam, M. Hain, M. Schmiedchen, S. Stankovic, T. Tschudi, *Wellenfrontkorrektur mit Hilfe von Flüssigkristallzellen*, DGaO Jahrestagung, Innsbruck (2002)
27. S. Somalingam, M. Hain, S. Stankovic, T. Tschudi, *Schaltbare Flüssigkristall-Elemente zur Generierung doughnutförmiger Intensitätsverteilungen*, DGaO Jahrestagung, Innsbruck (2002)
28. M. Schmiedchen, M. Hain, S. Stankovic, T. Tschudi, *Schnell schaltbare diffraktive Linse auf Flüssigkristall-Basis*, DGaO Jahrestagung, Innsbruck (2002)
29. M. Hain, *Die Verwendung von Flüssigkristallen in der adaptiven Optik*, Invited Talk, Universität Kaiserslautern (2002)
30. M. Hain, T. Tschudi, *Anwendungen von Flüssigkristallen in der adaptiven Optik*, DARPEO, Polymere für die Elektronik und Optik, Invited Talk, Universität Darmstadt (2002)
31. T. Tschudi, M. Hain, S. Somalingam, S. Stankovic, *Adaptive Optik mit Flüssigkristallen*, Invited Talk, Universität Stuttgart (2002)

## Begleitete Diplomarbeiten

1. R. Glöckner, *Schnell schaltbare adaptive Flüssigkristall-Linsen mit tangential symmetrische Elektrodenstruktur* (2000)
2. J. Spannhake, *Design, Herstellung und Ansteuerung einer Flüssigkristalllinse auf der Basis einer mehrschichtigen Elektrodenstruktur* (2001)
3. K. Somalingam, *Adaptive Elemente auf der Basis von Flüssigkristallen* (2001)
4. M. Schmiedchen, *Schnell schaltbare diffraktive Linse auf Flüssigkristallbasis* (2002)
5. M. Hage, *Multifunktionale Phasenmodulatoren auf der Basis von schnellen Flüssigkristallen* (2003)



## Danksagung

Herrn Prof. Dr. Theo Tschudi danke ich für die freundliche Aufnahme in seine Arbeitsgruppe. Seine Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen waren für mich von größter Bedeutung.

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Seelig danke ich sehr für die Übernahme des Koreferates.

Frau Dr. Lingli Wang danke ich für ihr großes Engagement zu Beginn meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Meiner Arbeitsgruppe Mikrooptische Systeme danke ich für das produktive und freundschaftliche Klima, das für den Spaß an der Arbeit und damit auch für deren Erfolg entscheidend war. Besonders danke ich meinem Freund Dr. Svetomir Stankovic für die hervorragende Zusammenarbeit während der Promotion und die in jeder Hinsicht freundschaftliche Unterstützung.

Meinen engagiert arbeitenden Diplomanden Robert Glöckner, Jan Spannhake, Kanthan Somalingam, Marc Schmiedchen und Michael Hage möchte ich meinen großen Dank für die vielfältigen Beiträge aussprechen, die sie zu dieser Arbeit geleistet haben.

Unseren ehemaligen Mitarbeitern danke ich für die gute Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Djenan Ganic für die Arbeiten am Strahlformer und Frau Dr. Shanti Bhattacharya für ihre Unterstützung bei der Vermessung optischer Laufwerke.

Den Arbeitsgruppen der experimentellen Licht- und Teilchenoptik, besonders der AG Photorefraktive Optik, der AG Optische Meßtechnik, der AG Laserphysik und nichtlineare optische Materialien, der AG Flüssigkristalle und der AG Elektronenoptik danke ich für vielen anregenden Diskussionen und die freundschaftliche Kooperation.

Der Firma Deutsche Thomson Brandt, insbesondere Ihren Mitarbeitern, Herrn Dr. Hartmut Richter und Herrn Dr. Joachim Knittel, danke ich für die gute Kooperation im Laufe der gemeinsamen Projekte und Ihren Beiträgen zum Gelingen dieser Arbeit.

Frau Ellen Happel danke ich herzlich für die Unterstützung bei der Bewältigung organisatorischer Probleme und die gute Zusammenarbeit.

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Haase und seiner Gruppe danke ich für die vielen wichtigen Diskussionen im Umgang mit ferroelektrischen Flüssigkristallen und für die zur Verfügung gestellten Materialien.

Der Feinmechanischen Werkstatt um Herrn Wilhelm Bernhardt und der Elektronikwerkstatt um Herrn Wolfgang Rök und Herrn Horst Kringel danke ich für die freundliche und kompetente Unterstützung während der gesamten Zeit. Herrn Gerhard Jourdan danke ich für die außerordentliche Hilfe bei der Herstellung der benötigten Chrom- und ITO-Substrate.

Bei meinem Freund Dr. Svetomir Stankovic und meiner Freundin Heike Schroeder bedanke ich mich ganz besonders für ihren unermüdlichen Einsatz und für die Durchsicht des Manuskriptes.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Mathias Hain  
geb. am 13.01.1972 in Wiesbaden

Eltern: RAin und Notarin Doris Hain-Schnittert  
Dipl.-Ing. Helmut Hain

## Schulbildung

1978 - 1982 Grundschule Riederberg in Wiesbaden  
1982 - 1984 Dilthey-Gymnasium in Wiesbaden  
1984 - 1991 Humboldt-Gymnasium in Wiesbaden, Abitur im Juni 1991

## Hochschulausbildung

1991 - 1998 Studium der Physik an der Technischen Universität Darmstadt  
Abschluss 'Diplom' im März 1998  
Diplomarbeit: 'Flüssigkristallbasierendes Pickup-System'

1994 - 1995 Studium der Physik an der University of Bristol (England)  
Abschluss 'Bachelor of Science' im Oktober 1995  
Abschlussarbeit: 'Research of Medical Electrode'

1998 - 2003 Promotionsstudium an der Technischen Universität Darmstadt

## Berufstätigkeit

1997 - 2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
am Institut für Angewandte Physik der TU-Darmstadt  
unter Leitung von Prof. Dr. T. Tschudi

seit 1998 Verantwortlich für den Bereich 'Adaptive Optiken'  
Projektleitung bei den Forschungsvorhaben:  
'BlueSpot - Neuer optischer Schreib-/Lesekopf für die optische Disk'  
(FKZ 01 BS 609/0)  
'BluRay - Entwicklung von Kompensationselementen für die neue Generation optischer Laufwerke'  
(FKZ 01 BS 050A)